

DLR-IB-FA-BS-2017-151

**Untersuchung der Thermal-
charakteristik von trockenen
Mehrlagenpreformen**

Bachelorarbeit

Dominic Lähn



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2017-151

**Untersuchung der Thermalcharakteristik von
trockenen Mehrlagenpreformen**

Zugänglichkeit:

Stufe 1

Braunschweig, Juli, 2017

Der Bericht umfasst: 85 Seiten

Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann

Autor: 
Dominic Lähn

Abteilungsleiter: 
Prof. Dr.-Ing. C. Hühne


Betreuer:
Alfred Tempel



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



**Technische
Universität
Braunschweig**



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Faserverbundleichtbau
und Adaptronik



Technische
Universität
Braunschweig



Untersuchung der Thermalcharakteristik von trockenen Mehrlagenpreformen

Bachelorarbeit

an der Technischen Universität Braunschweig

Verfasser: Dominic Lähn
im Studiengang: Maschinenbau
Matr.-Nr.: 4568610

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne (TU Braunschweig - IAF)

Betreuer:

Dr.-Ing. Henning Schlums (TU Braunschweig - IAF)

Betreuer:

Alfred Tempel M.Eng (DLR)

Bearbeitungszeitraum: 3 Monate

Abgabedatum 07.07.2017

**Bachelorarbeit
für
Herrn Dominic Lähn
Matr.-Nr. 4568610**

**Thema: Untersuchung der Thermalcharakteristik von trockenen
Mehrlagenpreformen**

Zielsetzung:

Aktuelle Arbeiten am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt haben zum Ziel, durch die Entwicklung eines automatisierten Preform-Konzeptes, Fertigungs- und Fügeprozesse in der Endlinienmontage zu beschleunigen und somit zu einer Reduzierung der gesamtheitlichen Kosten und Durchlaufzeiten beizutragen. Teilziel eines Projektes in enger Kooperation mit einem Flugzeughersteller ist ein seriennahes Industrialisierungskonzept, das die kontinuierliche Fertigung von Holmpreformen mit integrierter Lasteinleitungsfinne ermöglicht. Gegenstand dieser Abschlussarbeit ist die Untersuchung von temperierten Mehrlagen-Trockenfaser-halbzeugen mittels unterschiedlicher Methoden der Temperaturerfassung. Besonderer Fokus gilt der Aufnahme und dem Abgleich von parallel erfassten Messwerten zwischen kontaktbehafteten und berührungslosen Verfahren. Ziel ist eine validierte Bewertung der Aussagefähigkeit von IR-Temperaturmessungen an Oberflächen zum Rückschluss auf simultan erreichte Zwischenlagen-Temperaturwerte.

Arbeitsschritte:

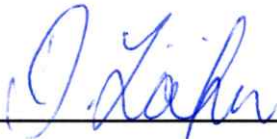
1. Literaturrecherche zum Stand der Technik bzgl. Temperaturverhalten von CFK-Preformen
2. Bestimmung und Bewertung der Genauigkeit von vorhandenen IR-Sensoren
3. Thermalversuche zur Analyse der Aussagefähigkeit von IR-Oberflächen-Messwerten bezüglich der real erreichten Zwischenlagentemperatur (Vergleichsmessung mit Thermoelementen)
 - a. Identifikation entscheidender Parametervariationen (Lagenaufbau / Materialstärke / Heizmittel / Heizdauer / geometrische Anordnung)
 - b. Auswahl von repräsentativen Parametervarianten / Erstellung eines Prüfplanes
 - c. Entwicklung einer geeigneten Vorrichtung
 - d. Versuchsdurchführung / Messdatenerfassung
4. Auswertung und Visualisierung der Versuchsdaten unter Maßgabe der Übertragbarkeit von IR-Oberflächendaten auf erreichte interlaminaire Temperaturwerte
5. Schritthaltende Dokumentation der Ergebnisse

Die Arbeit wird am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig durchgeführt. Die Betreuung erfolgt durch M.Eng. Alfred Tempel. Herr Dr.-Ing. Henning Schlums übernimmt die Betreuung seitens des IAF.

Die Ergebnisse sind entsprechend des Fortschritts der Arbeit mit dem Betreuer abzusprechen und im Bearbeitungszeitraum mehrfach vorzulegen.

Änderungen der Aufgabestellung sind nur mit Zustimmung des Instituts möglich. Die Bachelorarbeit ist fristgemäß elektronisch im WISA-Portal und gebunden in doppelter Ausfertigung im Institut für Adaptronik und Funktionsintegration der TU Braunschweig einzureichen.

Hiermit bestätige ich den Empfang der Aufgabenstellung:



Dominic Lähn

Bearbeitungszeit: 3 Monate

Ausgegeben am: 07.04.17

Abgegeben am:



Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne



Technische
Universität
Braunschweig

Technische Universität Braunschweig | Fakultät für Maschinenbau
Schleinitzstraße 20 | 38106 Braunschweig | Deutschland

Lähn, Dominic
Deutschland



Technische Universität
Braunschweig
Fakultät für Maschinenbau

Prüfungsdatenverwaltung

Schleinitzstraße 20
38106 Braunschweig
Deutschland

Telefon: +49(0)531 391-4016
Telefax: +49(0)531 391-4044
pdv-fmb@tu-braunschweig.de
www.tu-braunschweig.de/fmb

Datum: 05. Juli 2017

Abgabebescheinigung für Herrn Lähn (4568610)

Die Bachelorarbeit zum Thema **Untersuchung der Thermalcharakteristik von trockenen Mehrlagenpreformen** wurde am 05.07.17 um 10:08 Uhr von Herrn Lähn erfolgreich hochgeladen. Der Erstprüfer Herr Prof. Dr.-Ing. Hühne wurde per E-Mail darüber informiert.

Ihre Fakultät für Maschinenbau

(Diese Bescheinigung wurde automatisch erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.)

Hiermit bestätige ich, dass die hochgeladene Version meiner Arbeit mit der hier eingereichten, gebundenen Version identisch ist. Mir ist bewusst, dass eine inhaltliche Abweichung beider Versionen (mit Ausnahme der evtl. Anonymisierung meines Namens bzw. meiner Matrikelnummer) als Täuschungsversuch gilt und auch als solcher gewertet wird.

Dominic Lähn

Erklärung

Hiermit erkläre ich, Dominic Lähn, geb. am 02.08.1993, die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben.

Braunschweig, den 6. Juli 2017

Dominic Lähn

Überblick

In dieser Arbeit wird die Thermalcharakteristik von trockenen Mehrlagenpreformen untersucht, mit der Absicht, ein grundlegendes Verständnis für das Thermalverhalten von Preformen zu erarbeiten. Ziel ist insbesondere die Bewertung, inwiefern berührungslos ermittelte Oberflächentemperaturen einen Rückschluss auf innerhalb von Preformen erreichte Temperaturen zulassen. Außerdem werden Temperaturmesssensoren hinsichtlich ihrer Genauigkeit und ihrer Rückwirkung auf die zu messenden Preformen bewertet. Die Erwärmung der Preformen erfolgt mit Infrarotstrahlung. Die Thermaluntersuchungen werden bei stationären Temperaturen durchgeführt, um Einflussfaktoren zu eliminieren, welche bei der Betrachtung der zeitlichen Komponente zwangsläufig hinzukommen.

Abstract

The intention of this thesis is to develop a basic knowledge about the thermal behavior of preforms. Therefor the thermal characteristics of dry multi-layer preforms are studied. The particular aim is to validate if a conclusion about the temperatures inside preforms can be drawn from surface temperatures which are measured contactless. Furthermore temperature sensors are evaluated regarding their precision and the retroactive effects they have on the measured preforms. The preforms are heated with infrared radiation. To eliminate influencing factors that unavoidably occur when considering the temporal component, the examination of thermal characteristics takes place at stationary temperatures.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	X
Nomenklatur	XII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung und Ziele der Arbeit	2
2 Stand der Technik	4
2.1 Preforming und Resin Transfer Moulding	4
2.2 Verfahren zur Binderaktivierung	7
2.2.1 Konduktion	8
2.2.2 Konvektion	8
2.2.3 Induktion	9
2.2.4 Direktbestromung	10
2.2.5 Infrarot	11
2.3 Temperaturmessmethoden	12
2.3.1 Widerstandsthermometer	12
2.3.2 Thermoelemente	13
2.3.3 Infrarotsensoren und Wärmebildkameras	14
3 Verwendete Methodik und Messmittel	17
3.1 Erwärmung der Preformen	17
3.2 Temperaturmesssensoren	18
3.3 Faserhalbzeuge	19
3.4 Begriffsdefinitionen	21
3.5 Aufbau des Versuchsstands	21
4 Bestimmung der Genauigkeit von Temperatursensoren	23
4.1 Einfluss von IR-Strahlern auf IR-Sensoren	23
4.1.1 Theoretische Betrachtung	23

4.1.2	Versuchsbeschreibung	23
4.1.3	Bewertung des Einflusses	24
4.2	Befestigungsarten von Thermoelementen auf Preformen	25
4.2.1	Versuchsaufbau	25
4.2.2	Ungestörte Preform	26
4.2.3	Untersuchung der Rückwirkung der Befestigungsarten	27
4.2.4	Bewertung der Rückwirkung der Befestigungsarten	35
4.3	Vergleich von Thermoelementen und IR-Sensoren	36
5	Untersuchung des Thermalverhaltens von Mehrlagenpreformen	38
5.1	Einflussparameter auf die Temperatur zwischen Ober- und Unterseite . .	38
5.1.1	Messanordnung und Versuchsdurchführung	38
5.1.2	Lagenanzahl	41
5.1.3	Vorkompaktierung	42
5.1.4	Lagenzusammenstellung	43
5.1.5	Binder	44
5.2	Temperaturverlauf in Dickenrichtung	45
5.2.1	Versuchsaufbau	45
5.2.2	Theoretische Überlegung und Erwartungen	46
5.2.3	Experimentelle Untersuchung und Ergebnisse	47
5.3	Zweiseitige Bestrahlung	49
5.3.1	Versuchsaufbau	50
5.3.2	Experimentelle Untersuchung und Ergebnisse	51
5.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Thermalverhalten	52
6	Zusammenfassung	54
7	Ausblick	56
	Abbildungsverzeichnis	57
	Tabellenverzeichnis	59
	Literaturverzeichnis	60

A	Anhang	62
A.1	Datenblätter	62
A.1.1	Infrarotstrahler	62
A.1.2	Leistungssteller	63
A.1.3	Infrarotsensoren	64
A.1.4	Wärmebildkamera	66
A.1.5	Faserhalbzeuge	67
A.2	Diagramme	70
A.2.1	Temperaturverläufe in Dickenrichtung	70
A.2.2	Einflussparameter: Lagenanzahl	71
A.2.3	Einflussparameter: Vorkompaktierung	72
A.2.4	Einflussparameter: Lagenzusammenstellung	72
A.2.5	Zweiseitige Bestrahlung	73

Abkürzungsverzeichnis

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
IR	Infrarot
IATA	International Air Transport Association
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
MAG	Multiaxialgelege
RTM	Resin Transfer Moulding
UD	Unidirektional
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Nomenklatur

α	[]	Temperaturkoeffizient
β	[]	Temperaturkoeffizient
ε	[]	Emissionsgrad
λ	[m]	Wellenlänge
Λ	[W/(Km)]	Wärmeleitkoeffizient
I	[A]	Elektrische Stromstärke
k_{AB}	[]	Proportionalitätsfaktor
M_K	[J]	Strahlungsenergie eines Körpers
M_S	[J]	Strahlungsenergie eines schwarzen Strahlers
P	[W]	Elektrische Leistung
\dot{q}	[W]	Wärmestrom
R	[Ω]	Elektrischer Widerstand
U	[V]	Elektrische Spannung
T	[°C]	Temperatur

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der weltweite Anstieg des Verkehrsaufkommens ist in der gesamten Mobilitätsbranche, besonders aber in der Luftfahrtbranche, zu beobachten. So geht der Dachverband der Fluggesellschaften, die International Air Transport Association (IATA), von einem weltweiten Anstieg der Passagierzahlen von 3,8 Milliarden im Jahr 2016 auf 7,2 Milliarden im Jahr 2035 aus [1]. Gleichzeitig hat sich die IATA die Ziele gesetzt, ab dem Jahr 2020 CO₂-neutral zu wachsen und bis zum Jahr 2050 die CO₂-Emissionen auf 50 % des Niveaus des Jahres 2005 zu senken [2]. Diese Ziele lassen sich nur durch die Entwicklung effizienterer Flugzeuge erreichen, welche den Treibstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen pro Passagier und Kilometer senken.

Der Leichtbau besitzt in dieser Entwicklung einen besonderen Stellenwert, da das Flugzeuggewicht einen direkten Einfluss auf den Treibstoffverbrauch und die Emissionen hat. Durch die Verwendung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) können Metalle durch Werkstoffe mit einer höheren spezifischen Festigkeit ersetzt und die Strukturmasse reduziert werden. Besonders aus diesem Grund hat der Anteil an CFK im Flugzeugbau im letzten Jahrzehnt enorm zugenommen. So liegt der Anteil an CFK bei dem 2007 in Dienst gestellten Airbus A380 bei 22 % und bei dem 2015 in Dienst gestellten Airbus A350 bereits bei über 50 % [3, S. 1]. Die Fertigung von CFK-Bauteilen stellt die Produktion allerdings vor besondere Herausforderungen, welche die Prozesskosten und die Prozesszeiten gegenüber der konventionellen Metallbauweise stark steigern. Da Faserhalbzeuge eine geringe Formsteifigkeit aufweisen, ist insbesondere die maschinelle Handhabung problematisch. Deshalb erfolgt das Drapieren, das Umformen der Faserhalbzeuge, vielfach von Hand. Um die Produktion effizienter zu gestalten, sind automatisierte Fertigungsverfahren notwendig, welche die manuelle Handhabung auf ein Minimum reduzieren. Ein Ansatz, dies zu erreichen, ist, die Formgebung der Faserhalbzeuge von der Weiterverarbeitung zu Faserverbundbauteilen zu trennen. Eine von der Infiltration mit Matrixmaterial und der Aushärtung getrennte Formgebung wird als

Preforming bezeichnet. Dabei kann die Umformung zu einem Vorformling (Preform) auf einem anderen Formwerkzeug erfolgen als die Erzeugung des fertigen Bauteils. Dies hat den Vorteil, dass diese beiden Schritte nicht mehr nacheinander stattfinden müssen, sondern gleichzeitig stattfinden können.

Im Flugzeugbau kommen, abgesehen von gefrästen Spezialbauteilen in Hauptlastzonen, vor allem Profilbauteile, wie zum Beispiel Stringer und Spante, als Versteifungsstrukturen zum Einsatz. Für die effiziente Herstellung derartiger Profilbauteile eignen sich insbesondere kontinuierliche Preforming-Verfahren, da sie ununterbrochen Endlosprofile fertigen. Sie versprechen eine höhere Durchsatzrate bei der Herstellung von Profil-Preformen als es mit manuellen oder diskontinuierlichen (getakteten) Preforming-Verfahren möglich wäre.

1.2 Problemstellung und Ziele der Arbeit

Im Rahmen der Formgebung muss eine Preform in ihrer Geometrie fixiert werden. Die Fixierung erfolgt durch thermoplastische Binder, welche im Prozessverlauf durch Erwärmen der Preformen aktiviert (aufgeschmolzen) werden. Erst, wenn in der gesamten Preform die Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur des Binders liegt, gilt die Binderaktivierung als erfolgreich. Nach dem Abkühlen weist die Preform eine deutlich höhere Formsteifigkeit auf, als vor der Binderaktivierung. Deshalb haben das Thermalverhalten und die Binderaktivierung von Preformen direkten Einfluss auf die Preformqualität. Bauteile aus FVK sind in der Regel mehrlagig, weshalb die zugehörigen Preformen auch als Mehrlagenpreformen bezeichnet werden. Die Binderaktivierung von Mehrlagenpreformen ist ein entscheidender Prozessparameter innerhalb eines kontinuierlichen Prozesses. Mit zunehmender Lagenanzahl der Preform wird eine längere Heizstrecke oder eine langsamere Fördergeschwindigkeit notwendig. In Abbildung 1.1 wird dieser Zusammenhang am Beispiel der Binderaktivierung mittels Infrarotstrahlung in einem kontinuierlichen Rollumformprozess verdeutlicht. Bei derartigen Prozessen ist lediglich die Messung von Oberflächentemperaturen mit Strahlungsthermometern möglich. Eine kontaktbehaftete Temperaturmessung ist hierbei nicht sinnvoll, da eine Schädigung der Preform nicht ausgeschlossen ist.

Bisherige Untersuchungen zur Binderaktivierung befassen sich vor allem mit der Optimierung von Anlagen für bestimmte Preformgeometrien. Untersuchungen zum generellen Thermalverhalten von Preformen sind bisher nur eingeschränkt in der Literatur vorhan-

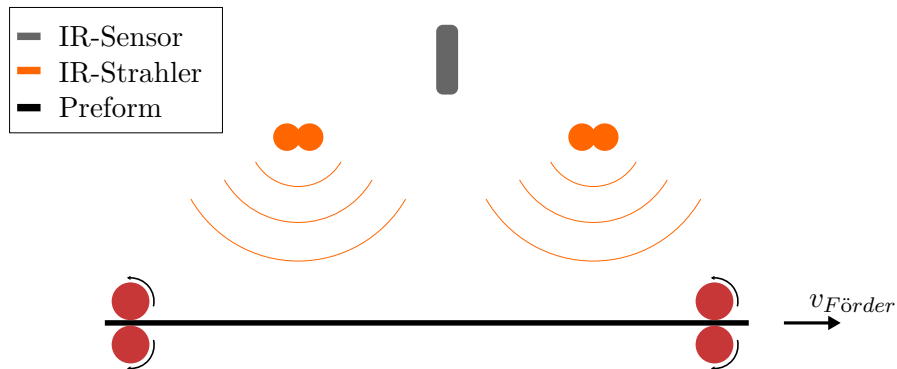


Abbildung 1.1: Binderaktivierung in einem kontinuierlichen Rollumformprozess

den. Deshalb ist das Ziel dieser Bachelorarbeit, ein grundlegendes Verständnis für das Thermalverhalten von Mehrlagenpreformen zu erarbeiten. Hierfür werden Preformen einseitig mit Infrarot bestrahlt und auf eine stationäre Temperatur erhitzt. Durch Untersuchung der Preformen bei einer stationären Temperatur werden Einflussfaktoren, welche bei Betrachtung zeitlicher Temperaturverläufe zwingend hinzukommen, eliminiert. Zunächst werden in Kapitel 3 geeignete Temperaturmesssensoren ausgewählt. In Kapitel 4 werden diese hinsichtlich ihrer Genauigkeit und ihrer Rückwirkung auf die zu messenden Preformen bewertet. Anschließend folgt in Kapitel 5.1 die Untersuchung verschiedener Einflussparameter (Lagenanzahl der Preform, Kompaktierung, etc.) auf den Temperaturgradienten zwischen Ober- und Unterseite. Weiterhin werden in Kapitel 5.2 Versuche zur Bestimmung des Temperaturverlaufs in Dickenrichtung von Preformen durchgeführt. Da eine kontaktbehaftete Temperaturmessung in kontinuierlichen Prozessen nicht sinnvoll ist, soll insbesondere bewertet werden, inwieweit durch Strahlungsthermometer ermittelte Oberflächentemperaturen Rückschlüsse auf Temperaturen innerhalb einer Preform zulassen.

Abschließend erfolgt in Kapitel 5.3 eine exemplarische Untersuchung der zweiseitigen Bestrahlung. Hierbei wird bewertet, ob sich die zweiseitige Bestrahlung mit Infrarot prinzipiell zur Binderaktivierung von Mehrlagenpreformen in kontinuierlichen Preforming-Prozessen eignet.

2 Stand der Technik

2.1 Preforming und Resin Transfer Moulding

Nach Neitzel [4, S. 96] ist eine Preform ein noch nicht mit einem Matrixmaterial infiltrierter, textiler Vorformling, welcher bereits in eine endkonturnahe Form gebracht und in dieser fixiert wurde. Die Herstellung von Faservorformlingen wird Preforming genannt und die dabei hauptsächlich im Flugzeugbau verwendeten Faserhalbzeuge sind Multiaxialgelege (MAG). MAG bestehen aus mehreren parallelen Lagen unidirektional abgelegter Faserbündel, welche durch Nähfäden in Dickenrichtung des Halbzeugs gegeneinander fixiert sind. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, hat jede Lage eines MAG zu den jeweils angrenzenden Lagen eine andere Faserausrichtung. Durch Anpassung der Faserausrichtungen an die am Bauteil angreifenden äußeren Lasten kann das Leichtbaupotential des Werkstoffs optimal ausgenutzt werden.

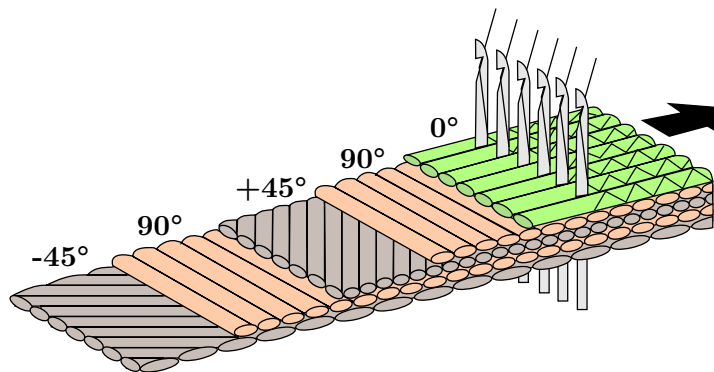


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Multiaxialgeleges nach [5]

Da unfixierte Preformen und Faserhalbzeuge eine geringe Formsteifigkeit aufweisen, werden zur Fixierung thermoplastische Binder verwendet. Diese Binder werden bei der Herstellung von MAG in Pulverform oder als Vlies zwischen die Lagen und auf die Unterseite des MAG aufgebracht. Um den Binder zu aktivieren, muss die Temperatur in der gesamten Preform mindestens die Schmelztemperatur des thermoplastischen Binders erreichen und der Binder vollständig in einen zähflüssigen Zustand übergehen. Nach dem Abkühlen und Erstarren des Binders ist die Preform in ihrer Kontur fixiert und weist eine deut-

lich höhere Formsteifigkeit auf, als vor der Binderaktivierung. Die Preform kann vor oder während der Binderaktivierung umgeformt werden. Mit diesem Vorgehen können auch mehrere MAG aufeinander abgelegt, umgeformt und zu einer Preform verbunden werden.

In dieser Arbeit werden MAG aus Kohlenstofffasern verwendet. Aus diesen werden Mehrlagenpreformen aufgebaut und deren Thermalverhalten untersucht. Der für die Binderaktivierung relevante Temperaturbereich liegt bei den verwendeten Faserhalbzeugen zwischen 100 °C und 160 °C. Eine detaillierte Vorstellung der Faserhalbzeuge erfolgt in Kapitel 3.3.

Anschließend an das Preforming muss der Faservorformling mit Matrixmaterial infiltriert und ausgehärtet werden, um ein Bauteil aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) zu erhalten. Ein dafür geeignetes Verfahren ist das Resin Transfer Moulding (RTM), welches einen hohen Automatisierungsgrad aufweist und sich zur Serienfertigung eignet. Der Prozessablauf ist in Abbildung 2.2 dargestellt und lässt sich in vier Prozessschritte unterteilen [6, S. 391]. Als Erstes werden trockene Fasermaterialien in ein mehrteiliges Formwerkzeug eingelegt. Im zweiten Schritt wird das Formwerkzeug geschlossen und Harz in die Kavität gepresst, bis diese vollständig gefüllt ist. In einem dritten Schritt wird das Bauteil ausgehärtet. Hierbei wird der anliegende Druck aufrecht erhalten, um eine vollständige Benetzung der Fasern mit Harz zu gewährleisten und Lufteinschlüsse zu verhindern. Im letzten Schritt wird das fertige Bauteil nach Aushärtung des Harzes aus dem Formwerkzeug entnommen.

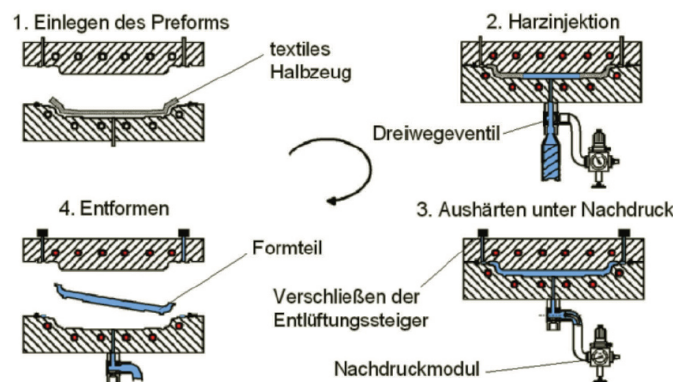


Abbildung 2.2: Prozessschritte RTM [6, S. 391]

Abhängig von der Preformkomplexität entfällt ein großer Teil der Herstellungskosten bei der automatisierten Fertigung von FVK auf das Preforming [7, S. 18]. Insbesondere das händische Drapieren der Faserhalbzeuge nimmt viel Prozesszeit in Anspruch. Deshalb bietet die Entwicklung und Optimierung von automatisierten Preforming-Verfahren ein großes Potential für die kostengünstigere Produktion von FVK, da so die manuelle Handhabung reduziert werden kann.

Eine Gruppe der Preforming-Verfahren ist das kontinuierliche Preforming, welches Purol [7, S. 19] als „*ununterbrochene Fertigung von Endlosprofilen mit konstanter oder veränderlicher Vorschubgeschwindigkeit*“ definiert.

Am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde ein kontinuierliches Preformverfahren mittels Rollumformung entwickelt. Mit dem Rollumformen können gängige, offene Profilformen wie beispielsweise C-, Z- oder H-Profile gefertigt werden. Kennzeichnend für dieses Verfahren ist, dass das Fasermaterial aufgespult zugeführt und von Rollen durch die Fertigungsanlage gefördert wird. Als Erstes muss der Binder in einer Heizstrecke aktiviert werden, wofür unterschiedliche Erwärmungsmechanismen anwendbar sind (vgl. Kap. 2.2). Die Binderaktivierung ist ein entscheidender Prozessparameter, da die Fördergeschwindigkeit, die Länge der Heizstrecke und die notwendige Zeit bis zum Erreichen der Schmelztemperatur des Binders zusammenhängen. Anschließend wird das Material zwischen Rollenpaaren hindurchgeführt, welche dieses umformen und die Preform durch Zusammenpressen der Lagen kompaktieren. Erst, wenn der Binder erstarrt ist, kann das Endlosprofil zu endlich langen Bauteilen geschnitten werden. Problematisch ist die Regelung der Fertigungsanlage, da Fasermaterial mit einer geringen Formsteifigkeit präzise geführt werden muss und dabei keine unbeabsichtigte Verscherung im Material auftreten darf. Am DLR wurde eine Prototypen-Anlage realisiert, welche die kontinuierliche Fertigung von geraden und gekrümmten C-Profil-Preformen aus MAG durch Rollenpaare bewerkstelligt. Die Fertigung gekrümmter Profile ist insbesondere im Flugzeugbau von großer Bedeutung, da dort eine Vielzahl derartiger Profile als Versteifungsstrukturen eingesetzt werden. Um eine Krümmung zu erreichen, muss der äußere Gurt eines C-Profils durch Verscherung des Fasermaterials gestreckt werden. Deshalb werden in der Umformung Rollenpaare hintereinandergereiht, welche am äußeren Gurt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fördern (siehe Abb. 2.3).

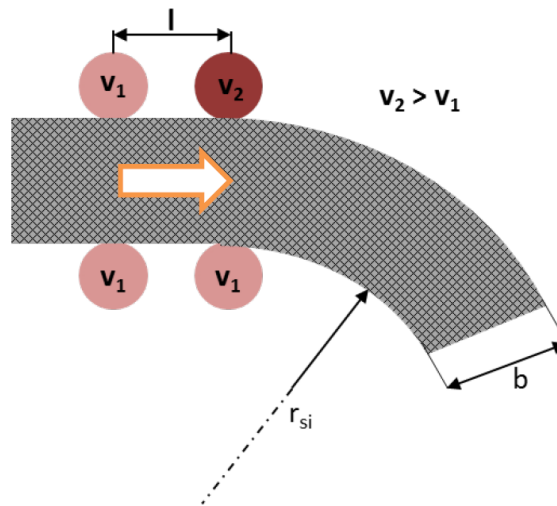


Abbildung 2.3: Prinzip der Fertigung gekrümmter Profile [8, S.4]

2.2 Verfahren zur Binderaktivierung

Ein wesentlicher Bestandteil des Preformings ist die Binderaktivierung (vgl. Kap. 2.1). Wenn der Binder nicht ausreichend aktiviert wird, ist die Preform nicht in ihrer Geometrie fixiert und weist keine ausreichende Formsteifigkeit auf. Dies erschwert die Handhabbarkeit im weiteren Prozess und kann dazu führen, dass die Preform ihre Geometrie aufgrund von Eigenspannungen nach der Umformung ändert.

Anforderungen an Verfahren zur Binderaktivierung sind eine möglichst homogene Erwärmung der Preformen und das Einhalten der maximal zulässigen Temperatur im Fasermaterial. Für den Fall des kontinuierlichen Preformings sind insbesondere eine Regelung mit kurzer Reaktionszeit und ein hoher Wärmeeintrag anzustreben, da die Fördergeschwindigkeit der Heizleistung angepasst werden muss.

Das eingesetzte Verfahren zur Binderaktivierung hat direkten Einfluss auf das Thermalverhalten von Preformen. Deshalb sind für ein Verfahren erarbeitete Erkenntnisse zum Thermalverhalten nicht zwangsläufig auf andere Verfahren übertragbar.

In diesem Kapitel werden Verfahren zur Binderaktivierung vorgestellt und ihre Funktionsprinzipien erläutert. Ein Vergleich der Verfahren und die Auswahl eines Verfahrens erfolgen in Kapitel 3.1.

2.2.1 Konduktion

Als Konduktion oder Wärmeleitung wird der Energietransport zwischen angrenzenden Molekülen aufgrund eines im Material vorliegenden Temperaturgradienten bezeichnet [9, S. 19]. Um den Binder mittels Konduktion zu aktivieren, wird die Preform mit einem wärmeren Körper in Kontakt gebracht. Geschieht das Preforming von Hand, so wird dafür meist ein Drapiereisen, ähnlich einem handelsüblichen Bügeleisen, verwendet. Die Heizfläche des Drapiereisens wird dabei durch eine elektrische Widerstandsheizung und einen Regler auf einer vorgegebenen Temperatur gehalten und auf die Preformoberfläche aufgelegt.

Am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR wurde die Prototypen-Fertigungsanlage VTP-NG zum kontinuierlichen Preforming von H-Profilen realisiert, welche Konduktion zur Binderaktivierung nutzt. Dabei wird das Fasermaterial entlang geheizter Leitbleche geführt, welche den Binder aktivieren (siehe Abb. 2.4) [10, S. 84 f.].



Abbildung 2.4: VTP-NG Anlage: Leitbleche mit integrierter Bindererwärmung

2.2.2 Konvektion

Nach dem VDI Wärmeatlas wird Konvektion als „*Energietransport in einem strömenden Medium*“ [9, S. 20] bezeichnet. Hierbei wird in freie und erzwungene Konvektion unterteilt. Freie Konvektion entsteht aufgrund von räumlichen Dichteunterschieden, welche ihre Ursache in örtlichen Temperaturgradienten haben [9, S. 753]. So findet beispielsweise

se in einem handelsüblichen Heißluftofen ein freier, konvektiver Wärmetransport statt, wenn das Umluftgebläse ausgeschaltet ist. Wird das Umluftgebläse eingeschaltet, so ist die Strömung der Luft von dem Gebläse aufgeprägt und ein Wärmetransport durch erzwungene Konvektion liegt vor. Durch Konvektion können lediglich Oberflächen aufgeheizt werden, der Wärmetransport in Materialien hinein geschieht durch Wärmeleitung (vgl. Kap. 2.2.1).

Für die Binderaktivierung durch Konvektion sind beim Preforming verschiedene Vorgehen denkbar. Geschieht die Binderaktivierung von Hand, so kann ein Heißluftgebläse (Fön) zum Einsatz kommen. Für den Fall des kontinuierlichen Preformings mittels Konvektion ist eine Förderung des Fasermaterials durch einen Durchlaufofen denkbar (vgl. Kap. 2.1). Vorteilhaft bei der Binderaktivierung mittels Konvektion in einem kontinuierlichen Preformingprozess sind die niedrigen Investitionskosten für die Installation eines Durchlaufofens. Demgegenüber steht der geringe konvektive Wärmeeintrag, sodass eine lange Durchlaufstrecke oder eine niedrige Fördergeschwindigkeit notwendig sind. Außerdem besteht die Gefahr der Überhitzung des Materials, wenn die Förderung unterbrochen wird, da Durchlauföfen nur langsam regelbar sind.

2.2.3 Induktion

Die Erwärmung mittels Induktion nutzt den Effekt aus, dass durch Anlegen eines zeitlich veränderlichen Magnetfeldes an einen elektrischen Leiter ein Strom induziert wird und es aufgrund von ohmschen Verlusten zu einer Dissipation der induzierten elektrischen Leistung in Wärme kommt. Dieses Prinzip findet beispielsweise bei Induktionskochplatten Anwendung, ist jedoch auch zur Binderaktivierung von Preformen geeignet. Grundvoraussetzung für eine Erwärmung mittels Induktion ist ein elektrisch leitendes Preformmaterial, welches über einen ausreichend großen elektrischen Widerstand verfügt, um effizient erwärmt zu werden [7, S. 84]. Außerdem müssen in sich geschlossene Leiterschleifen vorliegen, damit in Preformen effizient Wirbelströme induziert werden können [11, S. 36]. Somit ist eine Erwärmung von unidirektionalem Gelege nicht möglich, da Berührungspunkte zwischen Lagen unterschiedlicher Faserausrichtung vorliegen müssen, um geschlossene Leiterschleifen zu bilden [11, S. 36 f.]. Da Kohlenstofffasern elektrisch leiten und im Vergleich zu Kupfer einen großen elektrischen Widerstand aufweisen (Kohlenstofffasern in Faserrichtung: $8 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ bis $20 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$; Kupfer $0,0179 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ [7, S. 84]), eignen sich Kohlenstofffaserpreformen mit mehr als einer Faserausrichtung zur induktiven Binderaktivierung.

Bei der Binderaktivierung mittels Induktion handelt es sich um ein volumetrisches Verfahren, da die induzierten Wirbelströme die Preform in der gesamten Dickenrichtung erwärmen. Im Gegensatz zu zweidimensionalen Verfahren wie zum Beispiel der Binderaktivierung durch Konvektion, muss die Wärme nicht über die Oberfläche eingebracht und mittels Konduktion in das Material geleitet werden.

Ströhlein beschreibt eine im EU-Projekt MOJO entstandene Fertigungsanlage, welche die Anwendbarkeit der induktiven Binderaktivierung von MAG in einem kontinuierlichen Prozess demonstriert. Dabei wurden H-Profil-Preformen aus 12 Faserlagen mit einer Gesamtlänge von 40 m hergestellt und im RTM-Verfahren weiterverarbeitet [11, S. 108 f.].

2.2.4 Direktbestromung

Das Prinzip der Widerstandsheizung ist weit verbreitet und reicht in der Anwendung von Heizdecken im Haushalt bis zu Heckscheibenheizungen in Kraftfahrzeugen. Da Kohlenstofffasern elektrisch leiten (vgl. Kap. 2.2.3), stellt die Direktbestromung eine Möglichkeit zur Binderaktivierung dar. Über Kontaktierungsstellen wird ein Gleichstrom in die Preform eingeleitet, welcher aufgrund von ohmschen Verlusten zu einer Erwärmung führt. Da bei der Erwärmung von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) meist geringe Spannungen bei vergleichsweise hohen Strömen (>50 A) verwendet werden, gilt es, die Übergangswiderstände an den Kontaktierungsstellen so gering wie möglich zu halten. Dies dient dazu, eine Überhitzung des Fasermaterials im Kontaktierungsbereich zu verhindern [12, S. 40]. Demzufolge ist es problematisch, eine Binderaktivierung durch Direktbestromung in einen kontinuierlichen Preforming-Prozess zu integrieren, da eine linienförmige Kontaktierung mit Rollenpaaren zu einem großen Übergangswiderstand führt.

Die Anwendung in einem diskontinuierlichen Preforming-Verfahren wurde von Hemmen an der in Abbildung 2.5 dargestellten Preformgeometrie demonstriert. Der verwendete Lagenaufbau besteht aus insgesamt sechs Lagen Kohlenstofffasergelege und die Abmessungen der Preform sind 1100 mm in der Breite sowie 600 mm in der Höhe [12, S. 88 ff.]. Eine homogene Erwärmung der Preform wird dadurch erreicht, dass ein Gleichstrom nach einem vordefinierten Schaltschema zwischen zwei der drei Kontaktierungsstellen angelegt wird.

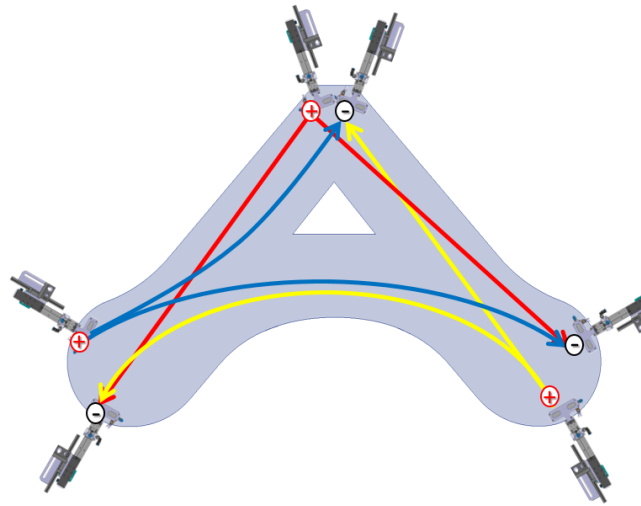


Abbildung 2.5: Preformgeometrie nach [12, S. 88]

2.2.5 Infrarot

Als technisch nutzbare Infrarotstrahlung bezeichnet man elektromagnetische Strahlung in einem Wellenlängenbereich von $\lambda = 1 - 10 \mu\text{m}$. Dieser Bereich wird weiterhin in kurzwellige ($\lambda = 1 - 2 \mu\text{m}$), mittelwellige ($\lambda = 2 - 4 \mu\text{m}$) und langwellige ($\lambda > 4 \mu\text{m}$) Infrarotstrahlung unterteilt [13, S. 584]. Trifft diese Strahlung auf ein Material, so werden molekulare Schwingungen angeregt, welche die mikroskopische Form von Wärme sind [14, S. 25]. Abhängig von der Wellenlänge der verwendeten Infrarotstrahlung und der Beschaffenheit des bestrahlten Materials werden Teile der Strahlung absorbiert, von der Oberfläche reflektiert oder durchdringen das Material ohne eine Erwärmung hervorzurufen (Transmission). Mittel- und langwellige Infrarotstrahlung erwärmt im Allgemeinen nur die Oberfläche, während kurzwellige Strahlung tiefer in Materialien eindringt [14, S. 25]. Da aber Kohlenstofffasern Infrarotstrahlung bereits nach wenigen Zehntelmillimetern absorbieren [11, S. 27], wird nur die Oberfläche bei der Binderaktivierung von Kohlenstofffaserpreformen durch Infrarotstrahlung erwärmt. Der Wärmetransport in das Fasermaterial hinein erfolgt durch Wärmeleitung.

Infrarotstrahler stellen eine in der Industrie weit verbreitete Lösung bei Aufheizprozessen dar, welche sich durch eine schnelle Regelbarkeit und vergleichsweise geringe Investitionskosten auszeichnen. Demgegenüber stehen die in der ungerichteten Abstrahlung begründeten Leistungsverluste, welche mit steigendem Strahlerabstand zum Material zunehmen. Für einen effizienten Preforming-Prozess muss eine Anordnung von Infrarot-

strahlern gefunden werden, welche möglichst geringe Leistungsverluste bei einer homogenen Temperaturverteilung ermöglicht. In der in Kapitel 2.1 beschriebenen Prototypen-Anlage zur Fertigung von C-Profil-Preforms durch Rollumformen, wurde eine derartige Infrarotheizstrecke realisiert.

2.3 Temperaturmessmethoden

Bei der Erwärmung von Preformen im Zuge der Binderaktivierung sind Temperaturmessungen unerlässlich. Erst durch Einsatz einer Temperaturmessung ist eine Regelung und Bewertung der Binderaktivierung möglich. Die ermittelten Temperaturmesswerte dienen als Ist-Werte zum Abgleich mit Soll-Werten in Regelkreisen von Heizstrecken. Außerdem werden durch das verwendete Fasermaterial vorgegebene, zulässige Maximaltemperaturen durch Temperaturmesssensoren überwacht. Ein weiterer Aspekt ist die Überprüfung der vollständigen Binderaktivierung in einer Preform. Hierbei ist bei kontinuierlichen Preforming-Verfahren ein Rückschluss von berührungslos ermittelten Oberflächentemperaturen auf Temperaturen innerhalb von Preformen notwendig. Da Mehrlagenpreformen im Allgemeinen keine große Wärmekapazität aufweisen, ist eine möglichst rückwirkungs-freie Temperaturmessung anzustreben.

Temperaturmessgeräte lassen sich in Berührungs- und Strahlungsthermometer unterteilen [15, S. 155]. Die Temperaturmessung mit Strahlungsthermometern ermöglicht eine rückwirkungsfreie Temperaturmessung mit einer geringeren Verzögerung, als es mit Berührungsthermometern möglich ist. Grund hierfür ist, dass es keinen thermischen Kontakt zwischen Messobjekt und Messgerät gibt. So können bewegte Objekte, Körper mit einer geringen Wärmekapazität und Oberflächentemperaturen bis zu 1500 °C gemessen werden. Berührende Temperaturmessmethoden zeichnen sich durch eine höhere Genauigkeit und einen geringeren Preis gegenüber Strahlungsthermometern aus [15, S. 165].

In diesem Kapitel werden einige Berührungs- und Strahlungsthermometer vorgestellt und ihre Funktionsweisen erläutert. Die Auswahl der Temperaturmesssensoren erfolgt in Kapitel 3.2.

2.3.1 Widerstandsthermometer

Das Prinzip der Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern nutzt den Effekt aus, dass sich der Widerstand von Metallen mit der Temperatur verändert. Der Widerstand der meisten Metalle vergrößert sich mit steigender Temperatur und lässt sich

durch die Gleichung

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2] \quad (2.1)$$

mit den Temperaturkoeffizienten α und β sowie dem Referenzwiderstand R_0 bei einer Referenztemperatur T_0 beschreiben [15, S. 156]. Liegen nur kleine Temperaturänderungen vor, so kann mit guter Näherung davon ausgegangen werden, dass sich die Widerstandsänderung linear zur Temperaturänderung verhält und der nichtlineare Temperaturkoeffizient β kann vernachlässigt werden [16, S. 162]. Die hauptsächlich in Widerstandsthermometern verwendeten Metalle sind Platin und Nickel, da sich ihre Widerstände stark mit der Temperatur ändern. Prinzipiell können aber alle Metalle mit einem temperaturabhängigen Widerstand zum Einsatz kommen.

In der praktischen Anwendung kann die Messung des Widerstands R durch das Anlegen eines konstanten Stromes I an den Messwiderstand und das Messen des Spannungsabfalls U realisiert werden. Der Widerstand wird dann nach dem ohmschen Gesetz berechnet:

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.2)$$

Dabei sollte der Strom möglichst gering sein, um eine Eigenerwärmung aufgrund der in Wärme umgesetzten elektrischen Leistung P zu vermeiden [15, S. 157]:

$$P = RI^2 \quad (2.3)$$

2.3.2 Thermoelemente

Ein Thermoelement besteht aus zwei elektrisch leitenden Metallen, welche an einer Verbindungsstelle durch Schweißen, Pressen oder Löten in elektrischen Kontakt gebracht sind [17, S. 41]. Besteht nun eine Temperaturdifferenz zwischen der Verbindungsstelle und den offenen Enden der Leiter, so kann an den Leiterenden eine thermoelektrische Spannung gemessen werden, welche von dem Proportionalitätsfaktor k_{AB} und der Temperaturdifferenz ($T_{\text{Verbindung}} - T_{\text{Offen}}$) abhängt:

$$U = k_{AB}(T_{\text{Verbindung}} - T_{\text{Offen}}) \quad (2.4)$$

Der Proportionalitätsfaktor hängt von den verwendeten Metallen A und B ab und beschreibt die Empfindlichkeit des Thermoelements. In Abbildung 2.6 ist der prinzipielle

Aufbau eines Thermoelements dargestellt.

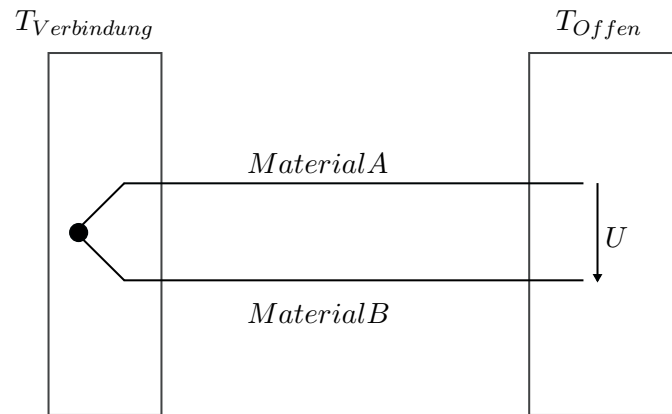


Abbildung 2.6: Prinzip eines Thermoelements

Da mit einem Thermoelement nur eine Temperaturdifferenz gemessen werden kann, muss die Temperatur an den offenen Leiterenden entweder vorgegeben oder bekannt sein, um einen absoluten Temperaturwert bestimmen zu können.

In der praktischen Umsetzung hält ein Thermostat die Temperatur der offenen Leiterenden konstant auf einem bekannten Wert. Alternativ wird die Temperatur der offenen Leiterenden nicht vorgegeben, sondern mit einem Widerstandsthermometer gemessen. Um eine absolute Temperatur zu erhalten, wird dann der vorgegebene oder gemessene Temperaturwert der Leiterenden auf die gemessene Temperaturdifferenz aufaddiert [16, S. 167].

In der einfachsten Ausführung besteht ein Thermoelement aus zwei Drähten unterschiedlicher Metalle, welche an einer Verbindungsstelle verschweißt sind. Da dafür Drähte mit einem Durchmesser von unter einem Millimeter zum Einsatz kommen können, weist diese Ausführung eine geringe Wärmekapazität und damit eine schnelle Reaktionszeit auf. Zudem ergibt sich bei geringen Drahtdurchmessern eine kleine Verbindungsstelle, sodass punktförmige Messungen möglich sind [15, S. 157].

2.3.3 Infrarotsensoren und Wärmebildkameras

Hat ein Körper eine Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes ($> 0K$), sendet er elektromagnetische Strahlung aus. Die berührungslose Temperaturmessung nutzt diese Eigenschaft aus und verwendet einen Teil der ausgesandten Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich zur Temperaturmessung [18, S. 4 f.].

Die Grundlage für das Kalibrieren von berührungslosen Temperaturmesssensoren und das Bestimmen wichtiger Materialkennwerte ist eine ideale thermische Strahlungsquelle, bezeichnet als schwarzer Strahler. Ein schwarzer Strahler ist ein Körper, auf dessen Oberfläche keine Reflexionen auftreten und die gesamte auftreffende Strahlung absorbiert wird. Die von einem schwarzen Strahler emittierte Strahlung hängt nur von der Temperatur ab. Dabei stellt die über den gesamten Wellenlängenbereich abgegebene Strahlungsenergie die maximal mögliche Energie dar, welche ein Körper bei einer bestimmten Temperatur in Form von Strahlung abgeben kann [18, S. 5]. Kein in der Technik verwendeter Körper emittiert die maximal möglich Strahlungsenergie, es gibt also keinen schwarzen Strahler [19, S. 1183]. Jedoch können Bedingungen erzeugt werden, bei denen ein Körper annähernd soviel Energie wie ein schwarzer Strahler emittiert. Unter diesen Bedingungen werden Infrarottemperatursensoren kalibriert [18, S. 5 f.].

Der Emissionsgrad ε beschreibt die Energie der ausgesandten Strahlung eines Körpers M_K , normiert auf die Strahlungsenergie eines schwarzen Strahlers M_S mit derselben Temperatur wie dieser Körper [19, S. 1171].

$$\varepsilon(T) = \frac{M_K(T)}{M_S(T)} \quad (2.5)$$

Somit ist $\varepsilon = 1$ bei einem schwarzen Strahler und $\varepsilon < 1$ bei allen technischen Körpern. Abgesehen von Metallen haben die meisten Stoffe bei einer Temperatur von 20°C einen Emissionsgrad nahe eins [17, S. 43]. Im Gegensatz zu schwarzen Strahlern hängt der Emissionsgrad nicht idealer thermischer Strahlungsquellen nicht nur von der Temperatur ab, sondern wird unter anderem von der Körperoberfläche und der inneren Zusammensetzung beeinflusst [20, S. 939]. Deshalb ist die Kenntnis des Emissionsgrades für die berührungslose Temperaturmessung von elementarer Bedeutung.

In Infrarotsensoren wird die vom Messobjekt emittierte Strahlung durch eine Optik auf einen thermischen Detektor fokussiert. Der Detektor ändert seine Temperatur infolge der absorbierten Strahlung und gibt ein elektrisches Signal aus, welches unter Einbeziehung der Umgebungstemperatur und des Emissionsgrades in einen Temperaturmesswert umgerechnet wird. Da hauptsächlich die infrarote Strahlung in einem Wellenlängenbereich von $\lambda = 0,7 - 14 \mu\text{m}$ eine messbare Erwärmung des thermischen Detektors bewirkt, wird die berührungslose Temperaturmessung auch als Infrarottemperaturmessung bezeichnet

[18, S.5]. Thermosäulen oder Strahlungsthermoelemente sind eine Bauart thermischer Detektoren. Sie bestehen aus einer Vielzahl in Reihe geschalteter Thermoelemente (vgl. Kap. 2.3.2), aufgebracht auf einen Mikrochip. Der Rahmen des Sensors dient als Bezugstemperatur T_{Offen} (vgl. Kap. 2.3.2). Infolge des Temperaturunterschiedes zwischen Rahmen und Thermosäule kommt es zu einer thermoelektrischen Spannung, welche in einen Temperaturmesswert umgerechnet wird [15, S. 162 f.].

Die Funktionsweise von Wärmebildkameras unterscheidet sich zu der von Infrarotsensoren lediglich darin, dass statt einem thermischer Detektor 20000 bis eine Millionen Detektoren auf einem Bildsensor nebeneinander angeordnet sind [18, S. 26]. Die von den einzelnen Detektoren ermittelten Temperaturmesswerte werden im Wärmebild jeweils mit einem Pixel dargestellt.

3 Verwendete Methodik und Messmittel

In diesem Kapitel werden das verwendete Verfahren zur Erwärmung von Preformen und die dabei eingesetzte Messtechnik erläutert. Weiterhin werden die untersuchten Faserhalbzeuge vorgestellt und Begriffsdefinitionen eingeführt.

3.1 Erwärmung der Preformen

Da der zeitliche Rahmen dieser Arbeit begrenzt ist, wird eine Methode aus der Vielzahl an Verfahren zur Erwärmung von Preformen ausgewählt und untersucht (vgl. Kap. 2.2). Dieser Auswahl werden folgende Kriterien zugrunde gelegt:

- Möglichst schneller und gleichmäßiger Wärmeeintrag
- Zugänglichkeit der Preform während der Messung
- Aufwand für die Realisierung des Heizfeldes
- Übertragbarkeit auf einen kontinuierlichen Prozess

Von den in Kapitel 2.2 vorgestellten Verfahren weist die Erwärmung durch Konvektion einen vergleichsweise geringen Wärmeeintrag auf und wird deshalb nicht eingesetzt. Bei der Verwendung von Induktion oder Direktbestromung sind aufgrund der hohen elektrischen Ströme, welche durch das Fasermaterial fließen, besondere Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Außerdem ist die Anlagentechnik vergleichsweise komplex, weshalb der Aufwand zur Realisierung eines Heizfeldes deutlich größer ist als bei den anderen vorgestellten Verfahren. Bei der Erwärmung durch Konduktion ist keine gute Zugänglichkeit der Preform während der Messung gegeben. Daher werden auch diese Verfahren nicht weiter betrachtet.

Die Erwärmung mittels Infrarotstrahlung weist einen vergleichsweise guten Wärmeeintrag auf und ermöglicht eine gute Zugänglichkeit der Preform während der Messung.

Zudem ist der Aufwand für die Realisierung eines Infrarotheizfeldes gering und eine Anwendung in kontinuierlichen Prozessen ist möglich. Deshalb wird zur Erwärmung der Preformen im Rahmen dieser Bachelorarbeit Infrarotstrahlung (vgl. Kap. 2.2.5) eingesetzt. Es werden kurzwellige Infrarotstrahler des Herstellers *Heraeus* mit einer Leistung von $P = 1500 \text{ W}$ und einer beheizten Länge von 200 mm verwendet (siehe Anhang A.1.1). Die Wellenlänge der abgegebenen Infrarotstrahlung ist $\lambda = 1 - 1,4 \mu\text{m}$. Die Steuerung der Strahler erfolgt mit einem Leistungssteller *CB 3x25* des Herstellers *Heraeus* (siehe Anhang A.1.2). Die Leistung wird mittels Pulsweitenmodulation, also durch hochfrequentes ein- und ausschalten der IR-Strahler, gesteuert. Mit einem stufenlosen Drehrad wird die Strahlerleistung händisch eingestellt.

3.2 Temperaturmesssensoren

Zur Erfassung der Oberflächentemperatur werden Infrarotsensoren (vgl. Kap. 2.3.3) des Modells *CS LT* des Herstellers *Optris* eingesetzt. Der thermische Detektor bei diesen Sensoren ist eine Thermosäule, welche laut Datenblatt auf Infrarotstrahlung in einem Wellenlängenbereich von $\lambda = 8 - 14 \mu\text{m}$ reagiert (siehe Anhang A.1.3.1). Die Genauigkeit dieser IR-Sensoren wird mit $\pm 1,5 \text{ K}$ oder $\pm 1,5 \%$ des Temperaturmesswertes in Grad Celsius angegeben. Der jeweils größere Wert ist die Messungenauigkeit. Der Durchmesser des Messflecks eines Sensors $d(s)$ wächst mit steigendem Abstand s zum Messobjekt. So wird bei einem Abstand zwischen Sensor und Messoberfläche von $s = 200 \text{ mm}$ eine Kreisfläche mit einem Durchmesser von $d(s) = 13 \text{ mm}$ und bei einem Abstand von $s = 400 \text{ mm}$ eine Kreisfläche mit einem Durchmesser von $d(s) = 27 \text{ mm}$ gemessen (siehe Anhang A.1.3.2).

Um bewerten zu können, inwieweit Oberflächentemperaturen Rückschlüsse auf Temperaturen innerhalb einer Preform zulassen, werden mit Drahtthermoelementen des Typs K (Materialpaarung NiCr-Ni) Zwischenschichttemperaturen gemessen. Die Genauigkeit dieser Thermoelemente wird mit $\pm 2,5 \text{ K}$ angegeben. Um möglichst rückwirkungsfrei messen zu können, werden Thermoelemente mit einem Drahtdurchmesser von 0,2 mm ausgewählt. Der geringe Drahtdurchmesser ermöglicht es, Thermoelemente zwischen zwei Lagen einzubringen, ohne den Spalt zwischen diesen Lagen merklich zu vergrößern. Da Thermoelemente eine kleine Messspitze haben, werden Temperaturen punktförmig gemessen (vgl. Kap. 2.3.2). Die Ausprägung des Messflecks von IR-Sensoren und Ther-

moelementen unterscheidet sich also und muss deshalb bei der simultanen Verwendung beider Temperaturmessmethoden berücksichtigt werden (siehe Abb. 3.1).

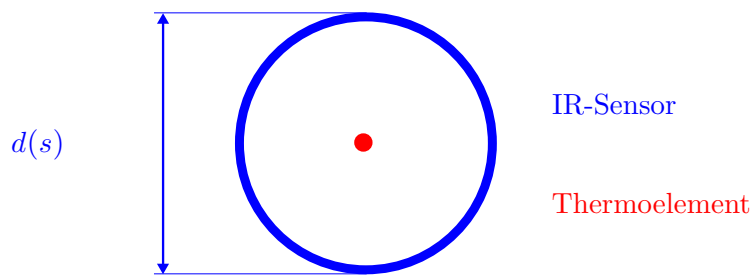


Abbildung 3.1: Vergleich: Messfleck eines IR-Sensors und Messpunkt eines Thermoelements

Mithilfe der Software *Labview* wurde ein Programm zur Messdatenerfassung erstellt. Das Programm ermöglicht das Abfragen, Darstellen und Speichern von Temperaturmesswerten, welche mit Thermoelementen und IR-Sensoren ermittelt werden. Dafür werden die Drahtthermoelemente an ein Messdatenerfassungsgerät des Modells *Redlab TC* des Herstellers *Meilhaus* angeschlossen.

Um die Rückwirkung verschiedener Befestigungsarten von Thermoelementen zu bewerten, werden mit einer Wärmebildkamera *ThermaCAM E4* des Herstellers *FLIR* örtliche Temperaturverläufe auf Oberflächen aufgenommen (siehe Anhang A.1.4).

3.3 Faserhalbzeuge

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Faserhalbzeuge, welche sich teilweise stark in ihren Eigenschaften und ihrem Aufbau unterscheiden. Jedoch liegt der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Untersuchung verschiedener Fasermaterialien, sondern auf der Entwicklung eines grundlegenden Verständnisses für das Thermalverhalten von Mehrlagenpreformen. Deshalb wird sich auf MAG aus Kohlenstofffasern des Herstellers *Toho Tenax* beschränkt. Die verwendeten Halbzeuge unterscheiden sich bezüglich des Binders und der Lagenanzahl des einzelnen MAGs, um verschiedene Zusammenstellungen von Preformen untersuchen zu können.

Folgende Faserhalbzeuge werden untersucht:

- Triaxial Gelege mit thermoplastischem Binder
- Triaxial Gelege ohne thermoplastischen Binder
- Biaxial Gelege mit thermoplastischem Binder
- Unidirektionales Gelege mit thermoplastischem Binder

Das Flächengewicht pro Lage beträgt bei allen Halbzeugen 194 g/m^2 und das Garn ist identisch (*TENAX-E IMS65 E23 24K 830 tex*). Die Bindungsarten unterscheiden sich bei den Halbzeugen, es wird jedoch davon ausgegangen, dass dies keinen Einfluss auf das thermische Verhalten hat. Das Nähgarn besteht aus einem Copolyamid. Es ist von besonderer Bedeutung, da es der thermisch unbeständigste Bestandteil der MAG ist. Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass sich das Nähgarn ab einer Temperatur von ca. 160°C zersetzt. Deshalb ist eine Oberflächentemperatur oberhalb 160°C während der Durchführung von Versuchen unbedingt zu vermeiden. Zur Aktivierung des Binders *EP 05311* ist ein Aufheizen der Preform auf Temperaturen zwischen 100°C und 110°C notwendig [21]. Ziel dieser Bachelorarbeit ist jedoch nicht die erfolgreiche Binderaktivierung von Preformen, sondern das bessere Verständnis des Thermalverhaltens. Deshalb ist es bei der Durchführung von Versuchen nicht notwendig diesen Temperaturbereich auf der gesamten Preform zu erreichen.

In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Kennwerte der untersuchten Faserhalbzeuge dargestellt. Die vollständigen Datenblätter können dem Anhang A.1.5 entnommen werden.

	Faserausrichtung:	Lagenanzahl/Flächengewicht:	Binder:
Triax mit Binder:	$+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$	3 Lagen mit je 194 g/m^2	EP 05311
Triax ohne Binder:	$+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$	3 Lagen mit je 194 g/m^2	ohne Binder
Biax mit Binder:	$+45^\circ/-45^\circ$	2 Lagen mit je 194 g/m^2	EP 05311
UD-Gelege mit Binder:	0°	1 Lage mit je 194 g/m^2	EP 05311

Tabelle 3.1: Übersicht über die verwendeten Kohlenstofffaserhalbzeuge

3.4 Begriffsdefinitionen

An dieser Stelle werden Definitionen der Begriffe *Lagenanzahl*, *Zwischenschicht* und *Lagenzusammenstellung* eingeführt, um im weiteren Verlauf eine einheitliche und eindeutige Bezeichnung zu ermöglichen. In Abbildung 3.2 sind drei Beispiele einer 6-Lagen-Preform in Schnittansicht dargestellt, anhand derer die Begriffe erklärt werden.

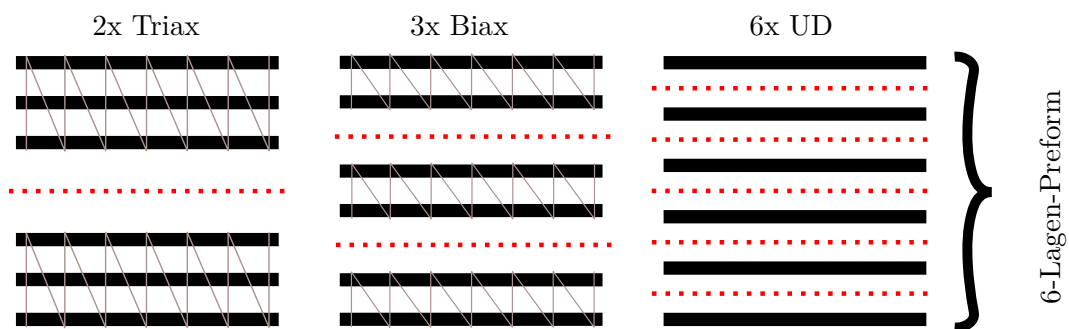


Abbildung 3.2: Drei Beispiele einer 6-Lagen-Preform in Schnittansicht

Die Lagenzusammenstellung gibt an, aus welchem Faserhalbzeug eine Preform aufgebaut ist. Demnach ist die Lagenzusammenstellung der linken Preform zwei Schichten Triax, bei der mittleren Preform drei Schichten Biax und bei der rechten Preform sechs Schichten UD. Die Lagenanzahl gibt an, aus wie vielen Einzellagen eine Preform besteht und ist bei allen dargestellten Preformen sechs. Schichten zwischen nicht vernähten Einzellagen sind mit roten Strichen gekennzeichnet und werden im Folgenden Zwischenschichten genannt. Bei gleicher Lagenanzahl hat eine Preform bestehend aus Triax weniger Zwischenschichten als eine Preform bestehend aus Biax oder UD. In die Zwischenschichten können Thermoelemente eingebracht werden, um Temperaturen innerhalb einer Preform zu messen.

3.5 Aufbau des Versuchsstands

Für die Untersuchungen der Thermalcharakteristik von Mehrlagenpreformen wird ein Versuchsstand aufgebaut, welcher die einseitige Bestrahlung einer Preform mit Infrarot ermöglicht (siehe Abb. 3.3). Das Gerüst des Versuchsstands besteht aus Aluminium-Profilen mit den Abmaßen 20 mm x 20 mm des Herstellers *Item*. Damit eine gute Zugänglichkeit der Preform während der Versuchsdurchführung gegeben ist, werden nur so viele Profile verwendet, wie unbedingt notwendig. Die Wärmeabgabe der Preform durch

Konvektion soll während der Bestrahlung möglichst wenig beeinflusst werden. Deshalb wird die Preform auf vier gespannte Kupferdrähte aufgelegt. Durch Auswahl von Drähten mit einem Durchmesser von 0,6 mm wird die Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung reduziert. Die Bestrahlung der Preform erfolgt von oben mit zwei IR-Strahlern. Damit der Versuchsstand verschiedenen Anordnungen angepasst werden kann, sind die IR-Strahler in horizontaler und vertikaler Richtung verstellbar. Es gibt zwei Haltevorrichtungen für Messmittel, es befindet sich eine oberhalb und eine unterhalb der Preform. Die Haltevorrichtung oberhalb der Preform ist in vertikaler Richtung verstellbar, um der Einstellung der IR-Strahler folgen zu können.

Angepasst an die beheizte Länge der IR-Strahler von 200 mm und die Abmaße des Versuchsstandes werden in dieser Bachelorarbeit Preformen mit einer Breite von 200 mm und einer Länge von 300 mm untersucht.



Abbildung 3.3: Versuchsstand

4 Bestimmung der Genauigkeit von Temperatursensoren

Thermoelemente zählen zu den berührenden Temperaturmessmethoden und üben deshalb eine Rückwirkung auf das Messobjekt aus (vgl. Kap. 2.3). IR-Sensoren hingegen stehen nicht mit dem Messobjekt in thermischem Kontakt, sondern messen die emittierte Infrarotstrahlung und haben somit keine Rückwirkung auf das Messobjekt. Da aber IR-Strahler zum Erwärmen der Preformen verwendet werden, ist eine Rückwirkung von IR-Strahlern auf IR-Sensoren denkbar. Deshalb wird in diesem Kapitel der Einfluss dieser Rückwirkungen auf die Genauigkeiten von IR-Sensoren und Thermoelementen untersucht.

4.1 Einfluss von IR-Strahlern auf IR-Sensoren

Da das Prinzip der Erwärmung mit IR-Strahlern auf dem Aussenden von elektromagnetischer Strahlung beruht und die Infrarottemperaturmessung ebendiese Strahlung empfängt und auswertet, wird überprüft, ob der IR-Strahler den IR-Sensor beeinflusst.

4.1.1 Theoretische Betrachtung

Die Strahler senden kurzwellige Infrarotstrahlung in einem Wellenlängenbereich von $\lambda = 1 - 1,4 \mu\text{m}$ aus, während die Sensoren auf langwellige Infrarotstrahlung in einem Wellenlängenbereich von $\lambda = 8 - 14 \mu\text{m}$ reagieren. Deshalb wird erwartet, dass die Infrarotstrahlung der IR-Strahler keinen Einfluss auf die IR-Sensoren hat.

4.1.2 Versuchsbeschreibung

In Abbildung 4.1 ist der prinzipielle Versuchsaufbau dargestellt. Der IR-Sensor wird mittig zwischen den beiden IR-Strahlern ausgerichtet und die Leistung der IR-Strahler wird auf $P = 10\%$ eingestellt. Im Versuch wird das UD-Gelege mit den IR-Strahlern aufgeheizt. Während der Aufheizphase werden die IR-Strahler ausgeschaltet. Sollte am UD-Gelege reflektierte Infrarotstrahlung den Sensor beeinflussen, so müsste sich ein Sprung im Temperaturverlauf zum Zeitpunkt des Ausschaltens wiederfinden. Um eine möglichst genaue Auflösung des Temperaturverlaufs zu erhalten, wird die Leserate des IR-Sensors

von 500 ms auf 50 ms verringert.

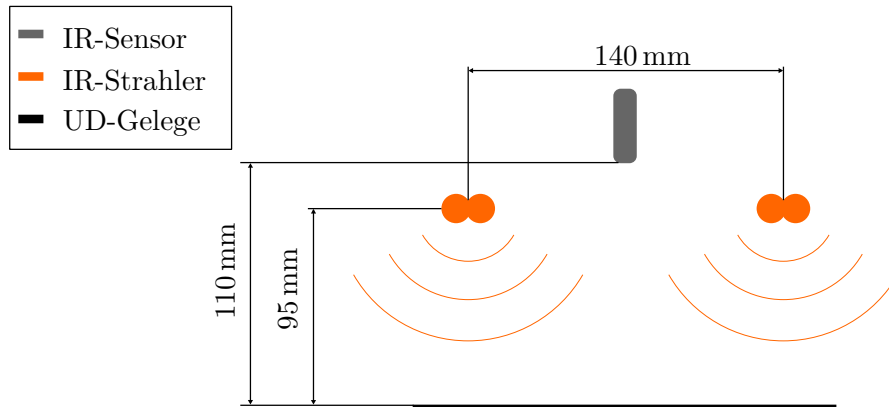


Abbildung 4.1: Versuchsaufbau: Einfluss von IR-Strahlern auf IR-Sensoren

4.1.3 Bewertung des Einflusses

In Abbildung 4.2 ist erkennbar, dass der Temperaturverlauf zum Zeitpunkt des Ausschaltens des IR-Strahlers stetig verläuft und keinen Temperatursprung aufweist. Die Temperatur fällt zum Zeitpunkt des Ausschaltens von $129,7^{\circ}\text{C}$ auf $128,4^{\circ}\text{C}$, was sich durch den konvektiven Wärmeverlust erklären lässt (vgl. Kap. 2.2.2). Der IR-Strahler nimmt also keinen Einfluss auf den IR-Sensor und die experimentelle Untersuchung steht im Einklang mit der theoretischen Betrachtung. Die IR-Sensoren können demnach während des Betriebs von IR-Strahlern eingesetzt werden, ohne dass hierdurch ein Messfehler auftritt.

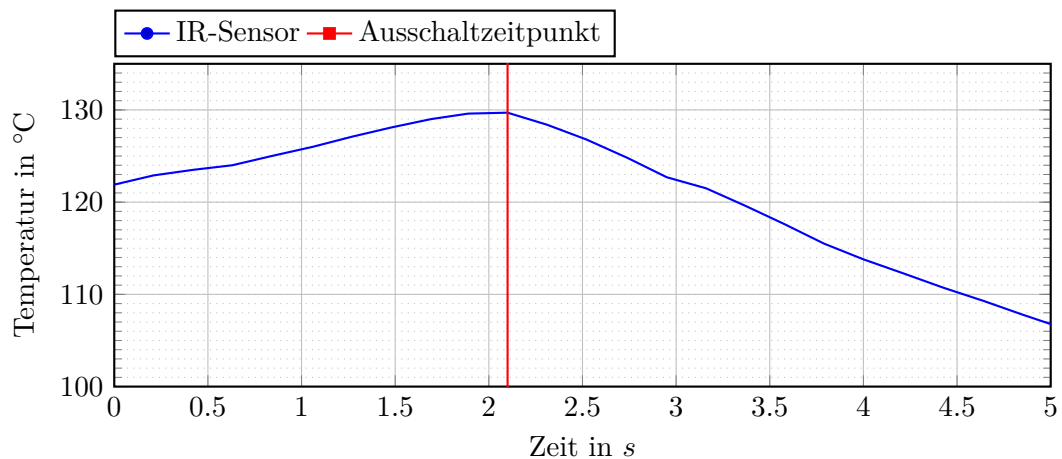


Abbildung 4.2: Temperaturverlauf: Einfluss von IR-Strahlern auf IR-Sensoren

4.2 Befestigungsarten von Thermoelementen auf Preformen

Thermoelemente sind Berührungsthermometer und haben deshalb immer eine Rückwirkung auf das zu messende Objekt (vgl. Kap. 2.3). Zur Fixierung von Thermoelementen auf Preformen sind verschiedene Befestigungsarten denkbar, welche im Folgenden auf ihren Einfluss bei der Temperaturmessung untersucht werden. Hierfür werden qualitative Temperaturverläufe von Preformenoberseiten mit einer Wärmebildkamera aufgenommen. Außerdem werden Temperaturmesswerte mit Thermoelementen und IR-Sensoren ermittelt und miteinander verglichen.

4.2.1 Versuchsaufbau

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Zwei IR-Strahler werden über einer 6-Lagen-Preform bestehend aus drei Schichten Biax mit Binder positioniert. Ein IR-Sensor und ein Thermoelement messen die Oberseitentemperatur an derselben Messstelle. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die Wärmebildkamera in dieser Darstellung nicht abgebildet, jedoch ist die Kamera auf dieselbe Messstelle, wie der IR-Sensor und das Thermoelement gerichtet. Die Leistung der IR-Strahler wird auf $P = 10\%$ eingestellt.

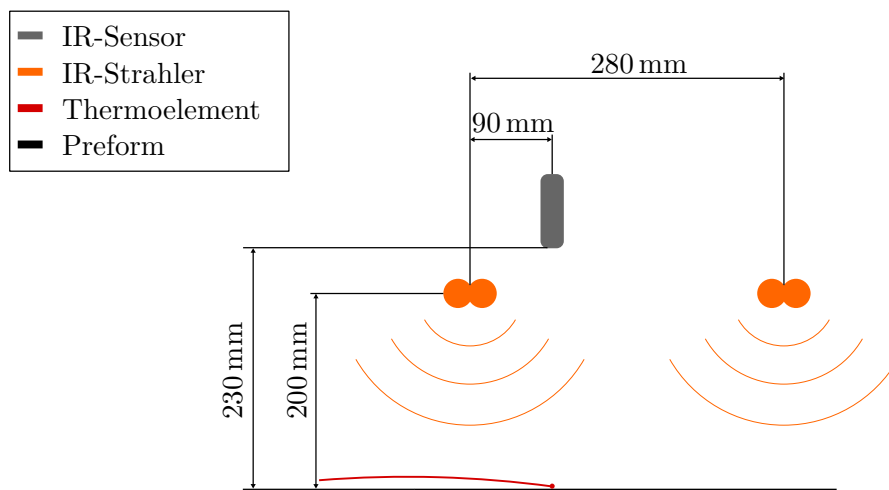


Abbildung 4.3: Versuchsaufbau: Befestigungsarten für Thermoelemente auf Preformen

4.2.2 Ungestörte Preform

Zunächst wird eine Referenzmessung ohne Thermoelemente auf der Preform durchgeführt, um die verschiedenen Befestigungsarten auf ihre Rückwirkung beurteilen zu können. In Abbildung 4.4b ist das Wärmebild der aufgeheizten Preformoberseite dargestellt. Die oben rechts gezeigten Temperaturmesswerte beziehen sich auf die mit Kreisen und Kreuzen dargestellten Messpunkte der Wärmebildkamera. Der Abstand zwischen Messstelle 1 und 3 beträgt ca. 35 mm. Messstelle 2 ist auf den Bereich gerichtet, auf den in den anschließenden Versuchen ein Thermoelement aufgebracht wird. Aufgrund zeitlicher Diskrepanzen zwischen Versuchsdurchführung und Kalibrierung der Kamera, kann ein systematischer Messfehler nicht ausgeschlossen werden. Allerdings verschiebt ein systematischer Messfehler die Temperaturwerte lediglich gegenüber der wahren Temperatur, weshalb Temperaturdifferenzen und qualitative Temperaturverteilungen mit der Wärmebildkamera bestimmt werden können.

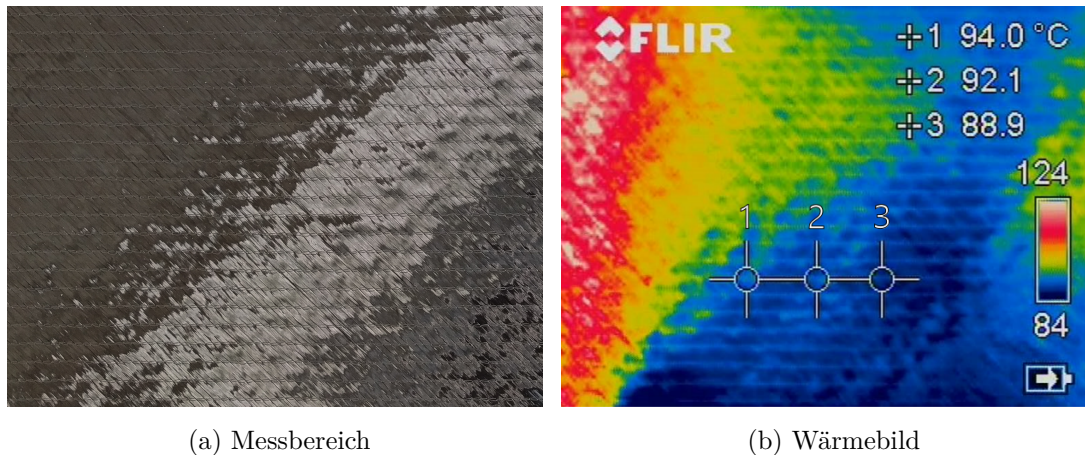


Abbildung 4.4: Ungestörte Preform

Aufgrund der nicht mittigen Ausrichtung des Messbereichs zwischen den IR-Strahlern ist eine von links nach rechts sinkende Temperatur auf dem Wärmebild erkennbar. Der Messbereich des IR-Sensors ist ein Kreis mit einem Durchmesser $d(s) = 14 \text{ mm}$ (vgl. Kap. 3.2). Der Mittelpunkt dieses Kreises liegt im Bereich der Messstelle 2. Hier liegen nur kleine Temperaturunterschiede vor, weshalb die Temperaturverteilung als homogen beschrieben wird. Die vom IR-Sensor ermittelte Oberflächentemperatur beträgt im aufgeheizten Zustand $98,1^\circ\text{C}$.

4.2.3 Untersuchung der Rückwirkung der Befestigungsarten

4.2.3.1 Klebestreifen

Um ein Thermoelement mit einem Klebestreifen zu befestigen, wird dieser mittig über der Messspitze des Thermoelements ausgerichtet und auf die Preformoberfläche geklebt (siehe Abb. 4.5a). Die Abmaße des in Abbildung 4.5a dargestellten Klebestreifens sind ca. 25 mm x 25 mm. Das verwendete Klebeband ist lichtdurchlässig und besteht aus einer 0,036 mm starken Polyesterfolie, auf die ein silikonbasierter Klebstoff aufgebracht ist [22]. Der Mittelpunkt der Messfläche des IR-Sensors liegt auf der Messspitze des Thermoelements.

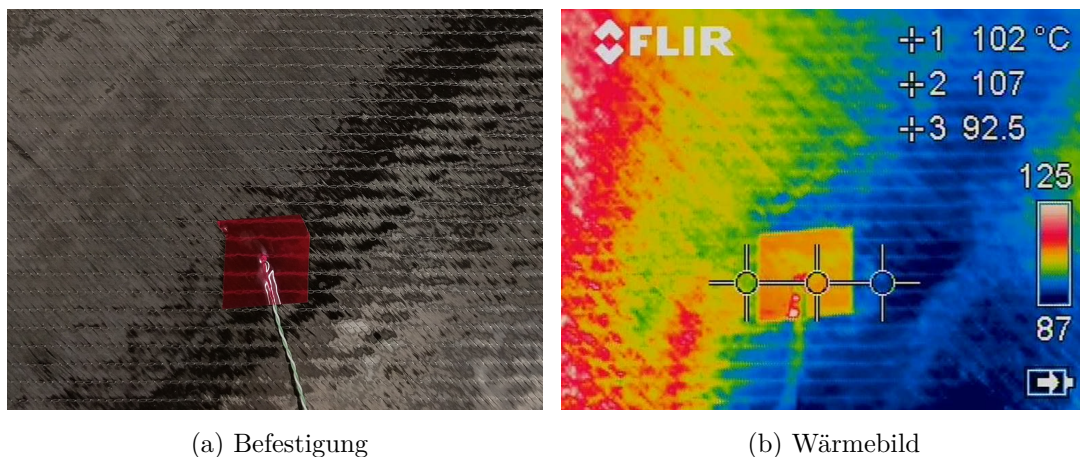


Abbildung 4.5: Befestigung eines Thermoelements mit 25 mm x 25 mm Klebestreifen

Der Klebestreifen ist auf dem Wärmebild deutlich zu erkennen und hat eine höhere Temperatur als seine Umgebung (siehe Abb. 4.5b). Die Temperatur des Klebestreifens ist gegenüber der Temperatur unmittelbar links vom Klebestreifen um 5 K und gegenüber der Temperatur unmittelbar rechts vom Klebestreifen um 14,5 K erhöht. Dort, wo der Klebestreifen über dem Thermodraht verläuft sind Stellen erkennbar, welche eine höhere Temperatur als der restliche Klebestreifen haben.

Bei den heißen Stellen des Klebestreifens handelt es sich um Lufteinschlüsse. Die kurzwellige Infrarotstrahlung durchdringt den lichtdurchlässigen Klebestreifen und die eingeschlossene Luft ohne eine wesentliche Erwärmung hervorzurufen [18, S. 11]. Beim Auftreffen auf das Fasermaterial wird die Infrarotstrahlung absorbiert und in Wärme um-

gesetzt (vgl. Kap. 2.2.5). Die zwischen Fasermaterial und Klebestreifen eingeschlossene Luft wirkt isolierend, weshalb sich eine Stelle mit Lufteinschluss stärker erwärmt als eine Stelle ohne Lufteinschluss.

Um zu erklären warum generell höhere Temperaturen auf dem Klebestreifen vorliegen, gibt es mehrere Ansätze.

1. Die Oberfläche von MAG besteht aus Faserbündeln und ist demnach vergleichsweise rau. Ein Klebestreifen hingegen hat eine glatte Oberfläche. Deshalb wird angenommen, dass durch Anbringen eines Klebestreifens auf das Fasermaterial die Oberfläche, welche zur konvektiven Wärmeabgabe zur Verfügung steht, verringert wird und deshalb die Temperatur steigt.
2. Der Wärmeleitkoeffizient Λ gibt an, ob ein Material Wärme gut leitet oder eine isolierende Wirkung besitzt. Polyester besitzt einen Wärmeleitkoeffizienten von $\Lambda = 0,18 \text{ W/(Km)}$ [9, S. 649]. Kohlenstofffasern verfügen in Faserrichtung über einen Wärmeleitkoeffizienten von $\Lambda = 6,1 \text{ W/(Km)}$ [23, S. 12]. Der Wärmeleitkoeffizient quer zur Faserrichtung ist geringer als längs zur Faserrichtung. Allerdings konnten keine Werte für diesen Koeffizienten in der Literatur gefunden werden. Unter der Annahme, dass der Wärmeleitkoeffizient von Polyester niedriger ist als der Wärmeleitkoeffizient von Kohlenstofffasern quer zur Faserrichtung, wirkt die Polyesterfolie isolierend. Wärme staut sich unter dem Klebestreifen und es kommt zu einer Temperaturerhöhung.

Neben den Wärmebildaufnahmen werden auch Temperaturmesswerte durch ein Thermoelement und einen IR-Sensor aufgezeichnet (siehe Abb. 4.6). Die durch den IR-Sensor ermittelten Messwerte sind ca. 8 K höher als die von dem Thermoelement ermittelten Messwerte. Dies erklärt sich durch die unterschiedlichen Ausprägungen der Messbereiche. Der IR-Sensor misst eine Kreisfläche mit einem Durchmesser von $d(s) = 14 \text{ mm}$, während das Thermoelement punktförmig misst (vgl. Kap. 3.2). Im Messbereich des IR-Sensors liegen während dieser Messung mehrere heiße Stellen, welche das Thermoelement nicht misst. Da vom IR-Sensor aufgenommene Temperaturwerte Mittelwerte der Temperaturverteilung im Messbereich sind, liegen diese Messwerte oberhalb der durch das Thermoelement ermittelten Messwerte.

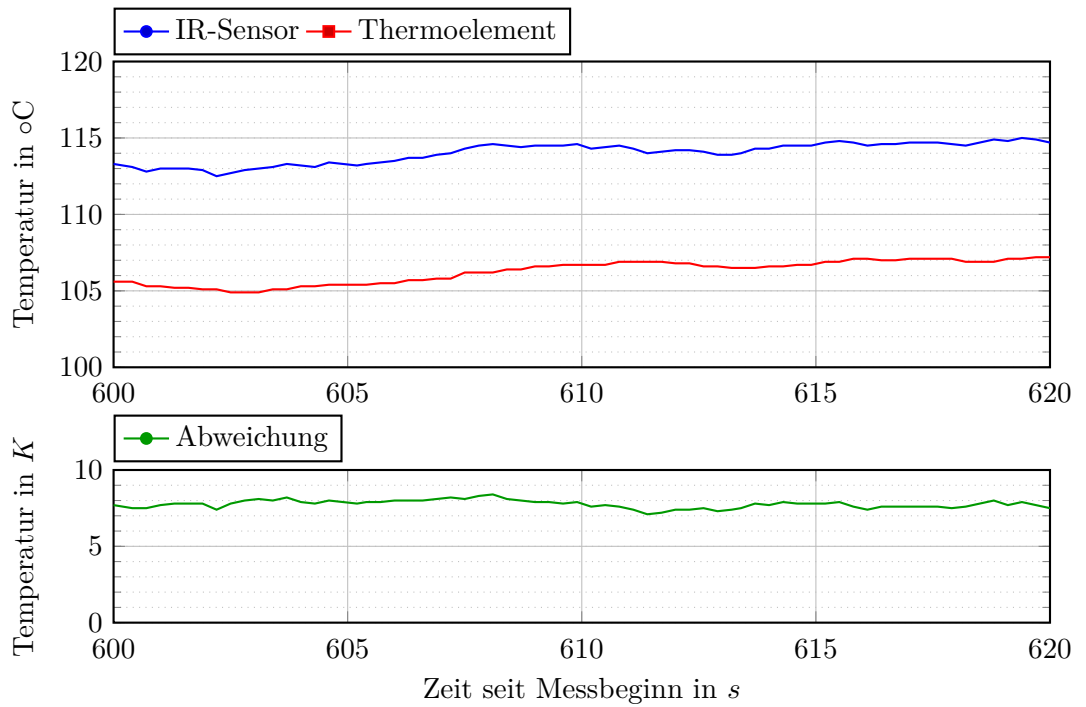


Abbildung 4.6: Temperaturmesswerte: Befestigung eines Thermoelements mit 25 mm x 25 mm Klebestreifen mit Lufteinschlüssen

In Abbildung 4.7 sind Temperaturmesswerte einer aufgeheizten Preform dargestellt, auf welche ebenfalls ein 25 mm x 25 mm großer Klebestreifen aufgebracht ist. Bei dieser Probe wird beim Aufbringen der Klebestreifen besonders darauf geachtet, Lufteinschlüsse zu vermeiden.

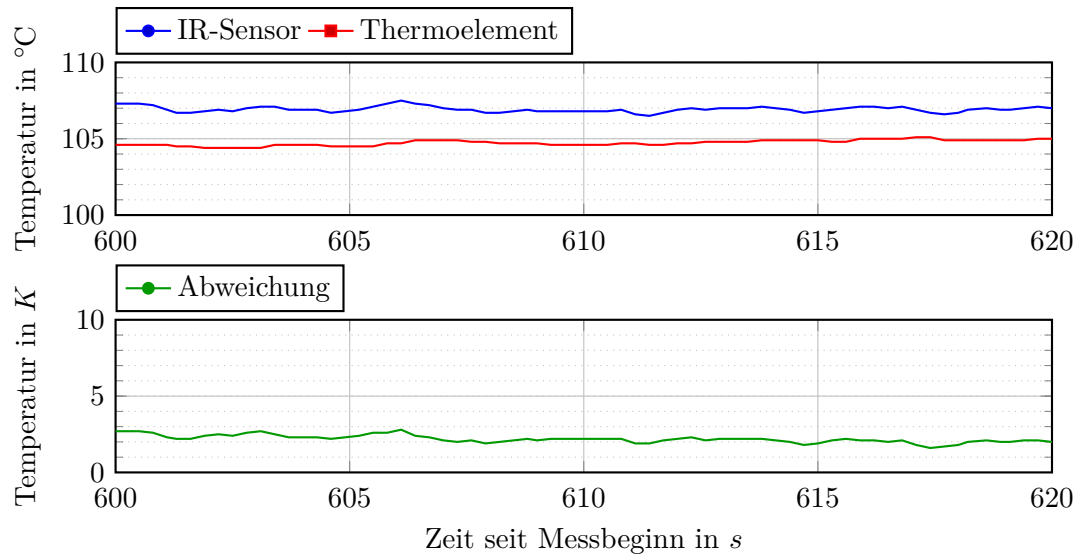


Abbildung 4.7: Temperaturmesswerte: Befestigung eines Thermoelements mit 25 mm x 25 mm Klebestreifen ohne Lufteinschlüsse

Die Abweichungen der von Thermoelement und IR-Sensor ermittelten Temperaturmesswerte liegen unter 3 K und sind damit deutlich geringer als bei dem in Abbildung 4.6 dargestellten Versuch. Dies bedeutet, dass der Einfluss von Lufteinschlüssen durch sorgfältiges Aufbringen der Klebestreifen reduziert werden kann. Die Rückwirkung des 25 mm x 25 mm großen Klebestreifens auf die Preform wird dadurch aber kaum herabgesetzt. Ein Klebestreifen dieser Größe erhöht die Temperatur der Preform örtlich gegenüber einer ungestörten Preform.

Die sichere Befestigung von Thermoelementen ist auch mit kleineren Klebestreifen möglich. Eine Reduzierung der Rückwirkung auf Preformen bei Verwendung kleinerer Klebestreifen ist denkbar. Deshalb wird der Einfluss eines mit einem ca. 5 mm x 5 mm großen Klebestreifen befestigten Thermoelements untersucht (siehe Abb. 4.8a). Bei Verwendung eines kleineren Klebestreifens, wäre kein guter Kontakt zwischen Preform und Thermoelement sichergestellt.

In Abbildung 4.8b ist das Wärmebild der aufgeheizten Preform dargestellt. Die Temperatur des Klebestreifens ist gegenüber der Temperatur an Messstelle 1 um 11 K und gegenüber Messstelle 3 um 15 K erhöht. Die Verwendung eines kleineren Klebestreifens reduziert also die Rückwirkung auf die Preform nur geringfügig.

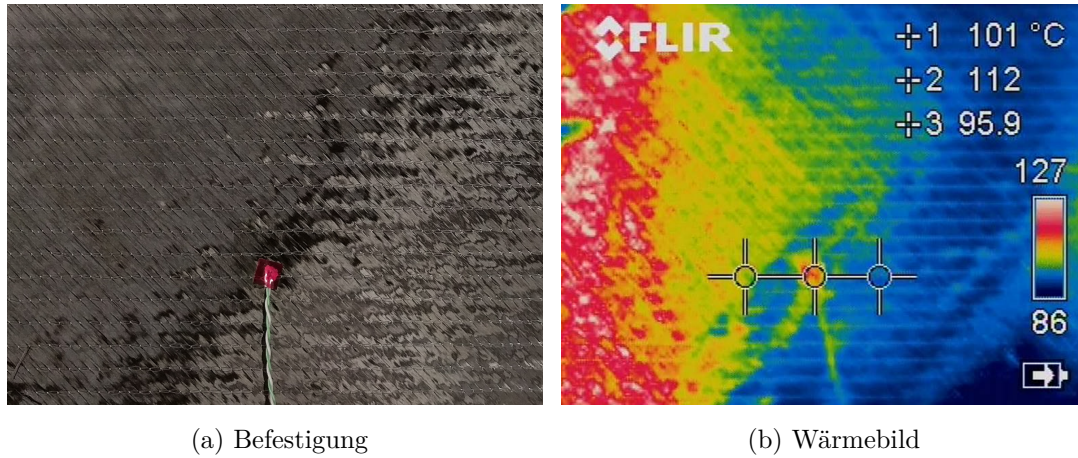


Abbildung 4.8: Befestigung eines Thermoelements mit 5 mm x 5 mm Klebestreifen

In Abbildung 4.9 sind die von dem Thermoelement und dem IR-Sensor ermittelten Temperaturmesswerte dargestellt. Anders als bei der Befestigung des Thermoelements mit einem 25 mm x 25 mm großen Klebestreifen, sind in diesem Fall die Messwerte des Thermoelements höher als die des IR-Sensors. Die Abweichung beträgt ca. 3 K. Dies erklärt sich ebenfalls durch die unterschiedlichen Ausprägungen der Messbereiche (vgl. Kap. 3.2). Der IR-Sensor misst nicht nur die heiße Oberfläche des Klebestreifens, sondern auch einen kälteren Bereich um den Klebestreifen herum. Deshalb sind die vom IR-Sensor ermittelten Temperaturmesswerte niedriger als die des Thermoelements.

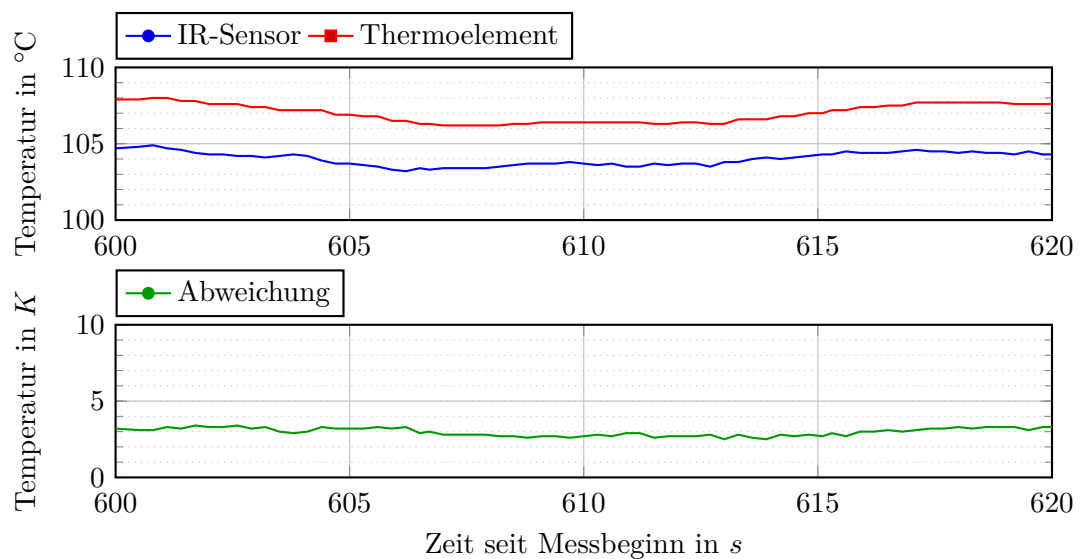


Abbildung 4.9: Temperaturmesswerte: Befestigung eines Thermoelements mit 5 mm x 5 mm Klebestreifen

4.2.3.2 Einstecken

Eine weitere denkbare Art, Thermoelemente auf Preformen zu fixieren, ist das Einstecken der Messspitze unter einen Nähfaden des MAG (siehe Abb. 4.10a). Durch den Nähfaden wird die Messspitze gegen die Preformoberfläche gedrückt und steht mit dieser in Kontakt. Da die Messspitze lediglich unter dem Nähfaden durchgeführt ist, wird zusätzlich ein Klebestreifen mit ca. 30 mm Abstand zur Messspitze über den Thermodraht geklebt (siehe Abb. 4.10a).

In Abbildung 4.10b ist das Wärmebild einer aufgeheizten Preform mit einer solchen Befestigung dargestellt. Messstelle 2 der Wärmebildkamera ist auf die Messspitze des Thermoelements gerichtet.

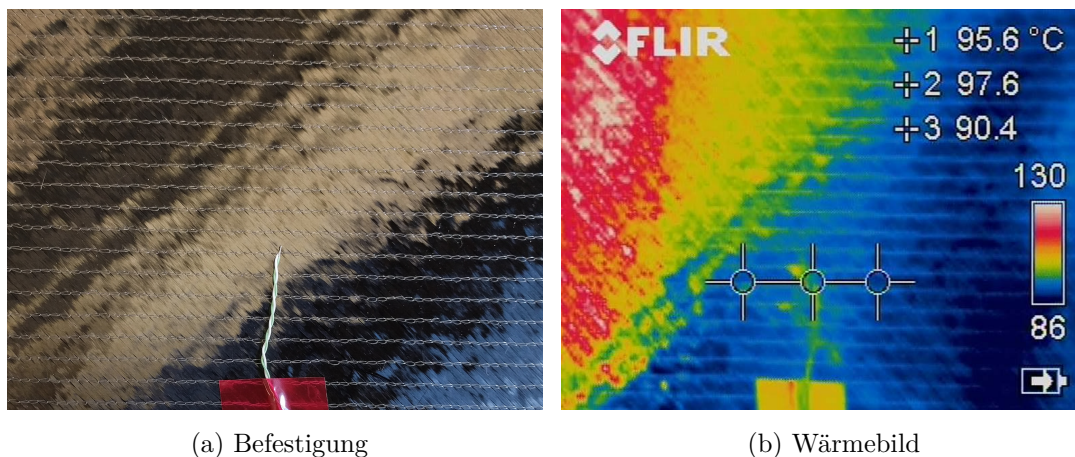


Abbildung 4.10: Befestigung eines Thermoelements durch Einstecken

Wie bei den Wärmebildern aus Kapitel 4.2.3.1 ist der Klebestreifen klar zu erkennen und hat gegenüber seiner Umgebung eine höhere Temperatur. Der Thermodraht weist ebenfalls eine höhere Temperatur gegenüber seiner unmittelbaren Umgebung auf. Es wird angenommen, dass (ausgehend vom Klebestreifen) Wärme durch den Thermodraht zur Messspitze geleitet wird und sich diese zusätzlich erwärmt.

In Abbildung 4.11 sind die von dem Thermoelement und dem IR-Sensor ermittelten Temperaturmesswerte dargestellt. Die Messwerte des Thermoelements liegen 10 K bis 13 K oberhalb der Messwerte des IR-Sensors. Diese Abweichung ist auf dem Wärmebild kaum sichtbar. Die Abweichung erklärt sich durch die Temperaturerhöhung des Thermodrahts.

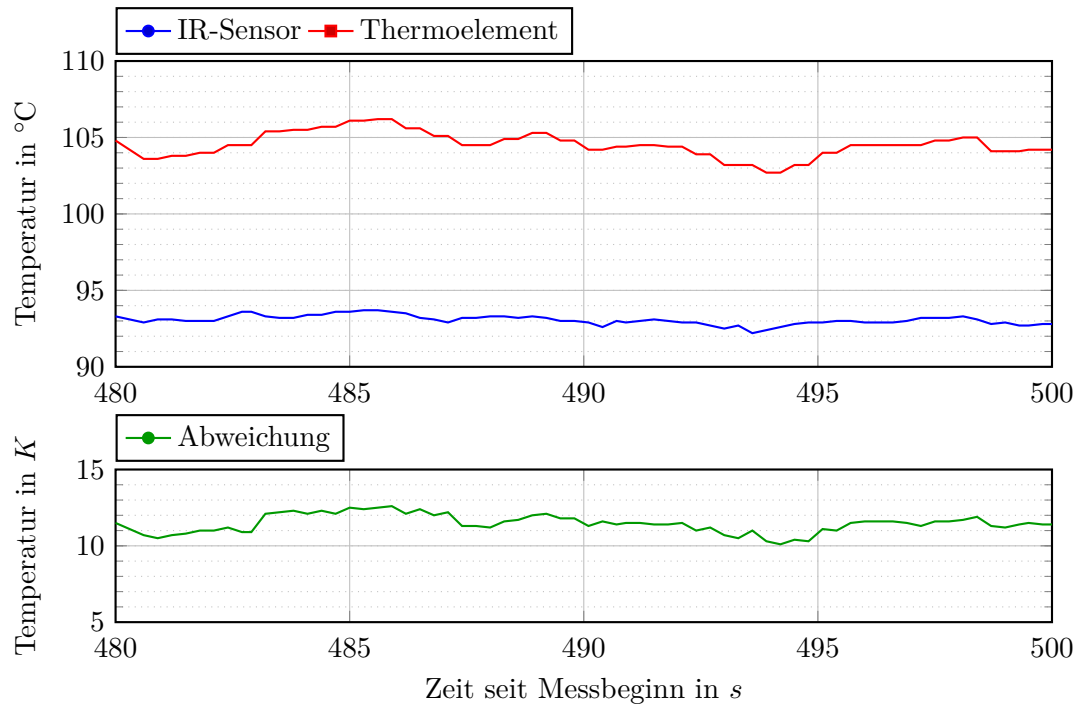


Abbildung 4.11: Temperaturmesswerte: Befestigung eines Thermoelements durch Einstecken

4.2.3.3 Vernähen

Eine weitere Methode, ein Thermoelement zu fixieren, ist das Vernähen der Messspitze mit der Preform. Gegenüber den bisher gezeigten Befestigungsarten ergibt sich der Vorteil, dass die Rückwirkung durch einen Klebestreifen entfällt. Verwendet wird ein handelsübliches Nähgarn aus Baumwolle, welches zwischen den beiden Einzeldrähten vor der Messspitze durchgeführt wird. Anschließend wird die Messspitze mit der obersten Schicht Biax vernäht (siehe Abb. 4.12a). Da bei MAG die einzelnen Lagen ohnehin miteinander vernäht sind (vgl. Kap. 2.1), wird angenommen, dass der Einfluss des zusätzlich angebrachten Nähgarns gering ist.

In Abbildung 4.12b ist das Wärmebild einer aufgeheizten Preform dargestellt, auf welche ein Thermoelement aufgenäht ist. Die örtliche Temperaturverteilung wird durch das Thermoelement wenig gestört.

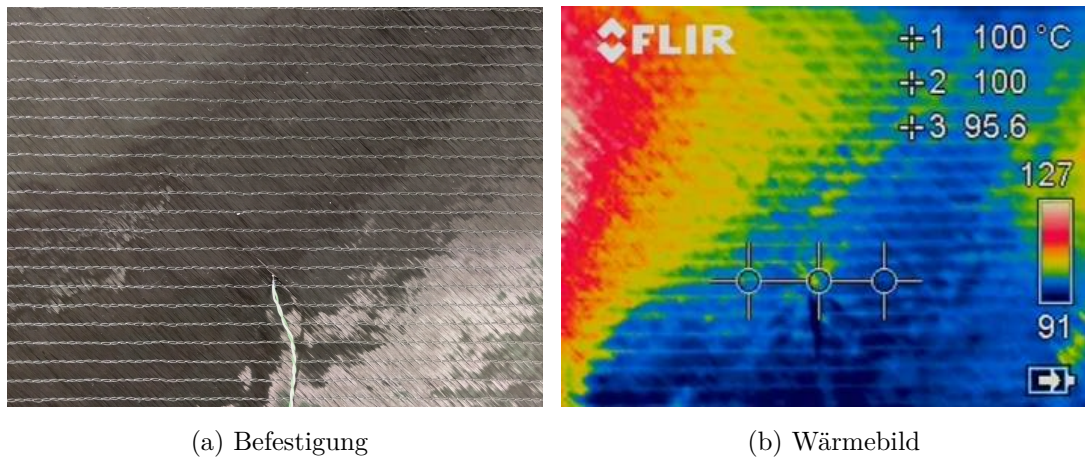


Abbildung 4.12: Befestigung eines Thermoelements mit einem Nähfaden

In Abbildung 4.13 sind die mit dem IR-Sensor und dem Thermoelement ermittelten Temperaturmesswerte sowie die Abweichung zwischen diesen Werten abgebildet. Die Abweichung liegt im dargestellten Zeitbereich unter 2 K und damit innerhalb der Messgenauigkeit der Sensoren. Der Einfluss des vernähten Thermoelements wird im Vergleich zu den vorher gezeigten Befestigungsarten als gering eingeschätzt.

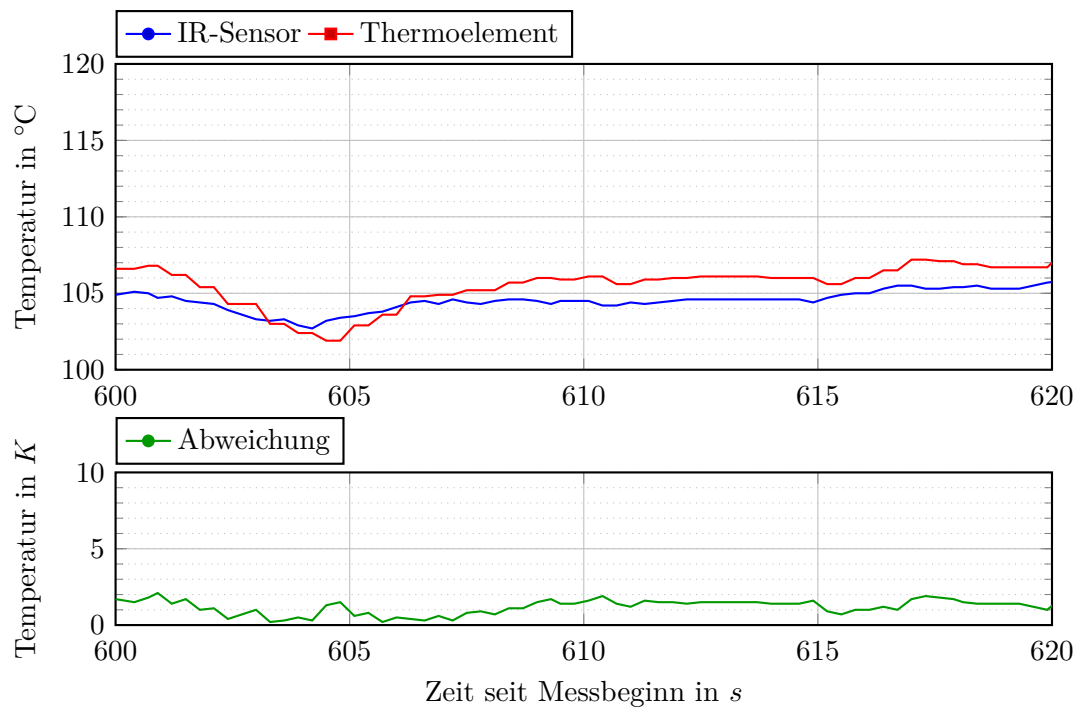


Abbildung 4.13: Temperaturmesswerte: Befestigung eines Thermoelements mit einem Nähfaden

4.2.4 Bewertung der Rückwirkung der Befestigungsarten

Alle Befestigungsarten, bei denen Klebestreifen zum Einsatz kommen, weisen eine große Rückwirkung auf die Preformoberseite auf. Dort, wo Klebestreifen aufgebracht werden, wird die Temperatur örtlich erhöht. Die geringste Rückwirkung auf die Preformoberseite hat die Befestigung mittels Nähfaden. Nachteilig bei dieser Methode ist jedoch der hohe Zeitaufwand gegenüber dem Befestigen mit Klebestreifen. Für eine möglichst rückwirkungsfreie Messung sollten Temperaturen auf Preformoberseiten mit vernähten Thermoelementen und mit IR-Sensoren gemessen werden.

Ist das Ziel einer Temperaturmessung allerdings nur eine qualitative Untersuchung, um beispielsweise den zeitlichen Temperaturverlauf zu ermitteln, so ist eine Befestigung von Thermoelementen mit Klebestreifen zulässig. Auf diese Weise ermittelte Temperaturmesswerte sind gegenüber der Temperatur einer ungestörten Preformoberfläche lediglich nach oben verschoben. Somit liegt ein systematischer Messfehler vor. Um in derselben Messung auch IR-Sensoren einsetzen zu können, sollte der Klebestreifen größer als der Messfleck des IR-Sensors sein. Außerdem sollte darauf geachtet werden, dass es keine Lufteinschlüsse unter dem Klebestreifen gibt.

4.3 Vergleich von Thermoelementen und IR-Sensoren

In Abbildung 4.14 sind die Abweichungen zwischen IR-Sensor und Thermoelement bei den verschiedenen Befestigungsarten dargestellt. Die in Kapitel 4.2.3 gezeigten Abweichungen zwischen Temperaturmesswerten, ermittelt durch einen IR-Sensor und ein Thermoelement, sind in dieser Abbildung für eine bessere Vergleichbarkeit gemittelt. Zusätzlich zu den Mittelwerten werden durch Fehlerbalken die maximalen Abweichungen zu dem jeweiligen Mittelwert dargestellt. Die für den 25 mm x 25 mm großen Klebestreifen dargestellten Werte beziehen sich auf den Versuch ohne Lufteinschlüsse.

Außerdem sind die Temperaturerhöhungen im Messbereich aufgrund der aufgetragenen Thermoelemente abgebildet. Diese werden aus den in Kapitel 4.2.3 gezeigten, simultan erfassten Wärmebildern ermittelt. Es handelt sich um systematische Messfehler, welche die verschiedenen Befestigungsarten hervorrufen. Unter der Annahme, dass die Temperatur zwischen Messstelle 1 und 3 ohne Einbringen eines Thermoelements linear abfällt, wird die Temperatur an Messstelle 2 bestimmt. Diese Temperatur wird mit der im Wärmebild ermittelten Temperatur an Messstelle 2 verglichen und eine Differenz gebildet. Diese Differenz ist die dargestellte Temperaturerhöhung.

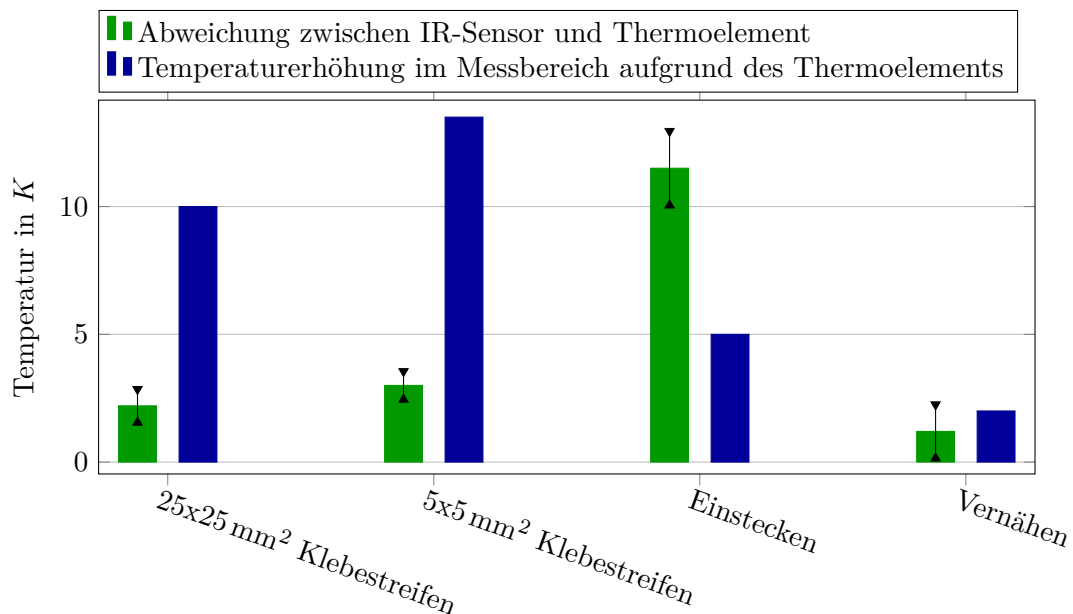


Abbildung 4.14: Abweichungen von Temperaturmesswerten bei den Befestigungsarten

Die Abweichung zwischen einem IR-Sensor und einem durch Einstecken befestigten Thermoelements beträgt 11,5 K. Dabei liegt der systematische Messfehler bzw. die Temperaturerhöhung im Messbereich bei 4,6 K.

Bei der Befestigung des Thermoelements mit einem 5 mm x 5 mm großen Klebestreifen beträgt die Abweichung 3 K. Der durch das Thermoelement hervorgerufene systematische Messfehler liegt bei 13,5 K. Eine simultane Verwendung der beiden Temperaturmessmethoden wird bei dieser Befestigungsart nicht empfohlen. Der IR-Sensor misst sowohl den heißen Klebestreifen als auch den kälteren Bereich um den Klebestreifen herum. Im Messfeld des IR-Sensors liegt also eine inhomogene Temperaturverteilung vor.

Die Abweichung zwischen einem IR-Sensor und einem Thermoelement, welches mit einem 25 mm x 25 mm großen Klebestreifen befestigt ist, liegt im Mittel knapp über 2 K. Der systematische Messfehler beträgt ca. 10 K. Die Temperatur wird zwar örtlich durch den Klebestreifen erhöht, allerdings messen beide Sensoren diese erhöhte Temperatur. Ist lediglich die Bestimmung eines qualitativen Temperaturverlaufs mit möglichst wenig zeitlichem Aufwand das Ziel der Temperaturmessung, so bietet sich diese Methode an. Die beste Übereinstimmung von Temperaturmesswerten wird mit der Befestigung durch Vernähen erzielt. Im Mittel liegt die Abweichung bei 1,2 K. Außerdem wird die Temperatur im Messbereich lediglich um ca. 2 K erhöht. Das vernähte Thermoelement beeinflusst die Messung mit dem IR-Sensor wenig und führt nur zu einer geringen Temperaturerhöhung auf der Preformoberfläche.

5 Untersuchung des Thermalverhaltens von Mehrlagenpreformen

Um ein grundlegendes Verständnis für das Thermalverhalten von Mehrlagenpreformen zu erarbeiten, werden in diesem Kapitel Preformen auf eine stationäre Temperatur aufgeheizt und untersucht. Zunächst erfolgt in Kapitel 5.1 die Untersuchung der Einflussparameter Lagenanzahl, Vorkompaktierung, Lagenzusammenstellung und Binder auf den Temperaturgradienten zwischen Ober- und Unterseite. Ziel ist die Identifikation einflussreicher Parameter und die Ableitung von Handlungsempfehlungen für kontinuierliche Preforming-Prozesse. Um die Eignung von Oberflächentemperaturmessungen zum Rückschluss auf Temperaturen innerhalb von Preformen zu bewerten, wird in Kapitel 5.2 der Temperaturverlauf in Dickenrichtung einer 24-Lagen-Preform untersucht. Abschließend erfolgt in Kapitel 5.3 eine Bewertung der zweiseitigen Bestrahlung hinsichtlich ihrer Eignung zur Binderaktivierung am Beispiel einer 24-Lagen-Preform.

Die IR-Strahler werden bei den Versuchen in diesem Kapitel mit einer Leistung von $P = 10\%$ betrieben. Bei dieser Leistung und einem Abstand von 200 mm zwischen Preform und IR-Strahlern werden Oberflächentemperaturen von 100 °C bis 120 °C im Messbereich erreicht.

5.1 Einflussparameter auf die Temperatur zwischen Ober- und Unterseite

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Parameter Lagenanzahl, Vorkompaktierung, Lagenzusammenstellung und Binder auf den Temperaturgradienten zwischen Oberseite und Unterseite untersucht. Der Fokus liegt auf der Ableitung von Maßnahmen zur Senkung des Temperaturgradienten zwischen Ober- und Unterseite.

5.1.1 Messanordnung und Versuchsdurchführung

Im Rahmen dieser Untersuchungen werden 14 verschiedene Preformen untersucht. Damit der Aufwand für diese Untersuchungen den zeitlichen Rahmen dieser Bachelorarbeit

nicht übersteigt, werden die Versuche nicht mehrfach, sondern jeweils einmal durchgeführt. Um mehrere Messungen in einem Versuch durchführen zu können, werden auf jeder Preform vier Messstellen ausgewählt. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die unteren IR-Sensoren nicht abgebildet.

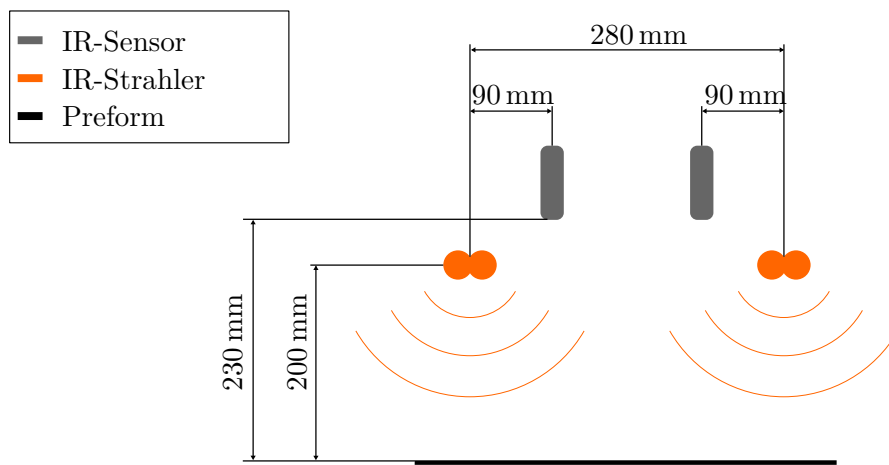


Abbildung 5.1: Versuchsaufbau: Einflussparameter auf den Temperaturgradienten

Die Messstellen sind in einem Quadrat mit einer Seitenlänge von 100 mm auf der Preform angeordnet (siehe Abb. 5.2). Bei der Versuchsdurchführung wird die Preform so ausgerichtet, dass jede Messstelle denselben Abstand zu den IR-Strahlern hat. Die Temperaturen an Ober- und Unterseite der Preformen werden mit IR-Sensoren und die Temperaturen in Zwischenschichten mit Thermoelementen gemessen. Aufgrund der großen Anzahl zu befestigender Thermoelemente werden diese mit 25 mm x 25 mm großen Klebestreifen befestigt. Die Vorkompaktierung der Preformen erfolgt bei einem Druck kleiner 22 mbar für zwei Minuten.

In den Versuchen zeigt sich, dass die Oberflächentemperaturen an den einzelnen Messstellen um bis zu 10 K voneinander abweichen. An Messstelle 2 und 3 liegt in allen Versuchen eine höhere Temperatur vor, als an Messstelle 1 und 4. Diese Abweichungen sind auf unvermeidbare Imperfektionen bei der Ausrichtung von IR-Strahlern, Preform und IR-Sensoren zurückzuführen. Außerdem ist denkbar, dass sich die Abstrahlcharakteristiken der IR-Strahler geringfügig unterscheiden.

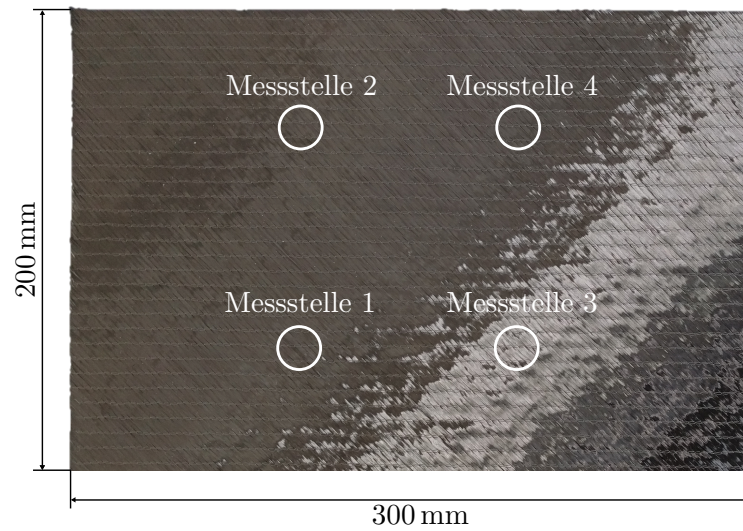


Abbildung 5.2: Draufsicht: Messanordnung

Für die Bestimmung von Einflussparametern auf den Temperaturgradienten zwischen Oberseite und Unterseite ist diese Beobachtung keine Einschränkung, da beim Vergleich einzelner Versuche die Temperaturen an den jeweiligen Messstellen miteinander verglichen werden.

5.1.2 Lagenanzahl

Um den Einfluss der Lagenanzahl auf den Temperaturgradienten zwischen Ober- und Unterseite zu bestimmen, werden vier Preformen bestehend aus Triax mit Binder untersucht. Die Preformen sind 3, 6, 9 und 12 Lagen stark und bestehen demnach aus 1 bis 4 Schichten Triax.

In Abbildung 5.3 sind die ermittelten Temperaturgradienten zwischen Oberseite und Unterseite der vier Preformen dargestellt. Die qualitativen Verläufe an den Messstellen sind ähnlich, weshalb lediglich Messstelle 1 abgebildet ist. Ein Diagramm mit den Verläufen aller Messstellen ist dem Anhang A.2.2 zu entnehmen. Bei Preformen zwischen 3 und 12 Lagen ist ein lineares Wachstum des Temperaturgradienten mit der Lagenanzahl erkennbar.

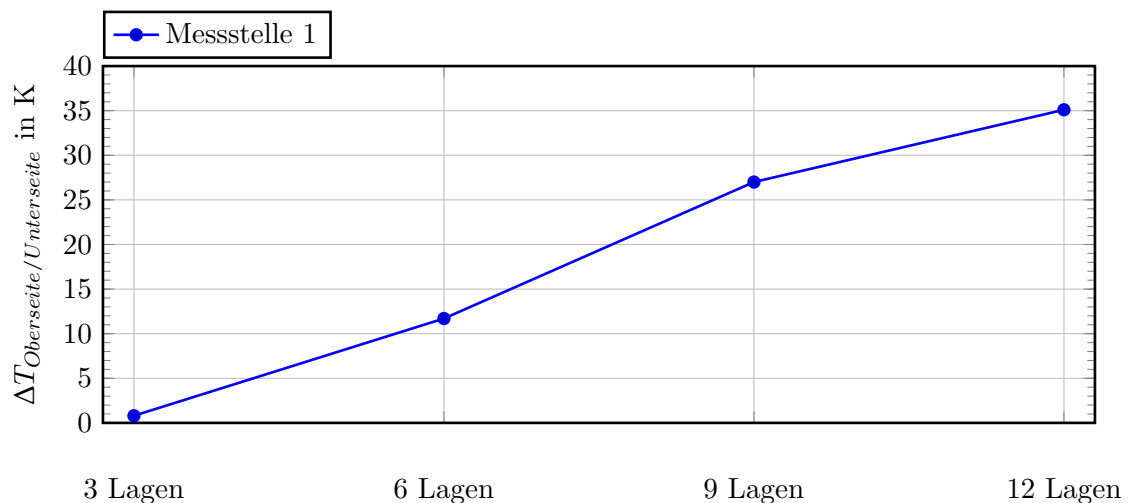


Abbildung 5.3: Einflussparameter: Lagenanzahl
(vier Preformen bestehend aus Triax mit Binder, vorkompaktiert)

5.1.3 Vorkompaktierung

Die Wärmeleitung in Dickenrichtung von Preformen erfolgt quer zur Faserrichtung. Die Wärmeleitung von Lage zu Lage erfolgt an Berührungspunkten zwischen Faserbündeln unterschiedlicher Orientierungen (siehe Abb. 2.1). Ein Einfluss einer Vorkompaktierung ist insofern denkbar, als dass durch eine Kompaktierung die Anzahl an Berührungspunkten erhöht werden kann und damit die Wärmeleitung begünstigt wird.

Um den Einfluss einer Vorkompaktierung auf die Wärmeleitung zu überprüfen, werden zwei identische 12-Lagen-Preformen aus Biax mit Binder aufgebaut. Eine Preform wird vorkompaktiert, die andere nicht. In Abbildung 5.4 sind die ermittelten Temperaturgradienten $\Delta T_{\text{Oberseite/Unterseite}}$ beider Preformen an den vier Messstellen aufgetragen. Dem Anhang A.2.3 ist ein weiteres Diagramm mit den Temperaturgradienten bei zwei 12-Lagen-Preformen, bestehend aus Triax mit Binder, zu entnehmen. Die qualitativen Verläufe gleichen sich, weshalb hier lediglich das Diagramm der Preformen, bestehend aus Biax mit Binder, dargestellt ist.

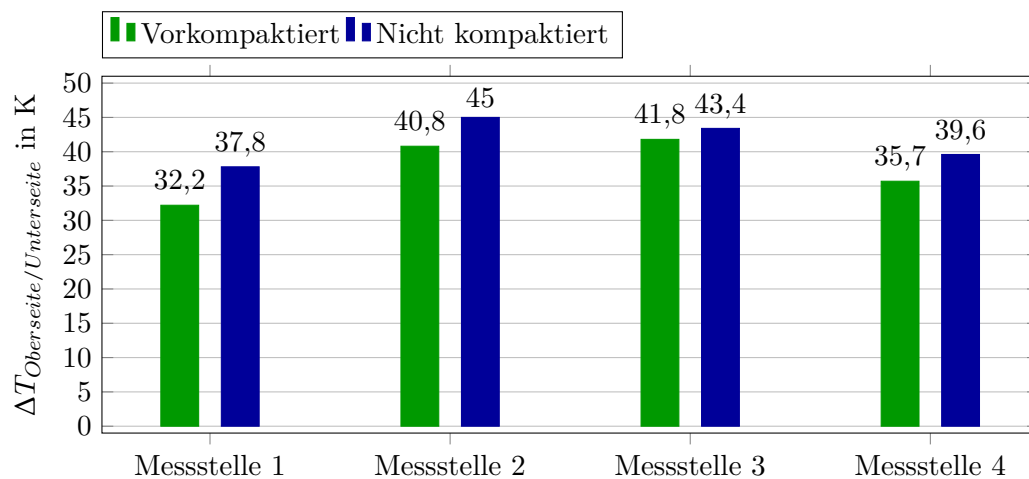


Abbildung 5.4: Einflussparameter: Vorkompaktierung
(zwei 12-Lagen-Preformen bestehend aus Biax mit Binder)

An allen Messstellen ist der Temperaturgradient $\Delta T_{\text{Oberseite/Unterseite}}$ bei der vorkompaktierten Preform geringer. An Messstelle 1 ist diese Verringerung am größten und beträgt 15 %. Demnach verringert eine Vorkompaktierung den Temperaturgradienten $\Delta T_{\text{Oberseite/Unterseite}}$.

5.1.4 Lagenzusammenstellung

Abhängig von dem verwendeten Faserhalbzeug (Triax, Biax oder UD) gibt es mehr oder weniger Zwischenschichten in einer Preform. An Zwischenschichten angrenzende Lagen sind nicht miteinander vernäht, sondern nur aufeinander abgelegt. Ein Einfluss der Lagenzusammenstellung auf den Temperaturgradienten $\Delta T_{\text{Oberseite/Unterseite}}$ ist insofern denkbar, als dass die Zwischenschichten die Wärmeleitung durch eine Preform behindern können.

Um den Einfluss verschiedener Lagenzusammenstellungen zu untersuchen, werden 12-Lagen-Preformen bestehend aus Biax mit Binder und 12-Lagen-Preformen bestehend aus Triax mit Binder miteinander verglichen. In Abbildung 5.5 sind die Temperaturgradienten $\Delta T_{\text{Oberseite/Unterseite}}$ für zwei vorkompaktierte Preformen mit unterschiedlichen Lagenzusammenstellung abgebildet. Es ist keine Tendenz erkennbar. Dem Anhang A.2.4 sind die Temperaturgradienten von zwei nicht kompaktierten 12-Lagen-Preformen mit verschiedenen Lagenzusammenstellungen zu entnehmen. Auch dort gibt es keine Tendenz. Daraus ist erkennbar, dass die Lagenzusammenstellung keinen nennenswerten Einfluss auf den Temperaturgradienten $\Delta T_{\text{Oberseite/Unterseite}}$ hat.

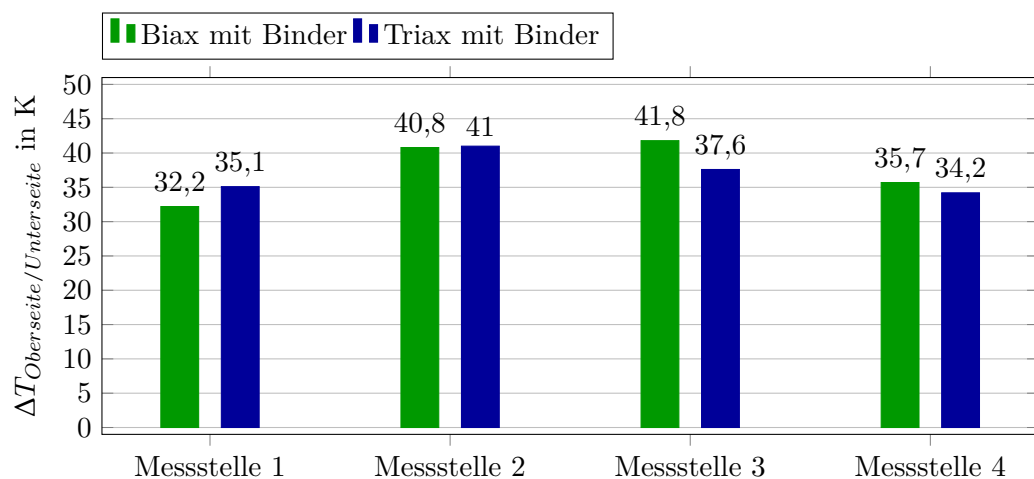


Abbildung 5.5: Einflussparameter: Lagenzusammenstellung
(zwei 12-Lagen-Preformen, vorkompaktiert)

5.1.5 Binder

Da der Pulverbinder bei dem Faserhalbzeug Triax mit Binder lediglich einen Anteil von ca. 2,5 % am Flächengewicht hat, ist ein Einfluss aufgrund des Gewichtsanteils unwahrscheinlich. Allerdings ist der Pulverbinder auf die Unterseite der MAG aufgebracht und verbindet die einzelnen Schichten einer Preform nach der Binderaktivierung. Demnach ist ein Einfluss des Binders auf den Wärmeübergang durch die Zwischenschichten denkbar.

Um dies zu überprüfen, werden zwei 12-Lagen-Preformen untersucht. Eine Preform besteht aus Triax mit Binder, die andere aus Triax ohne Binder. Mit Ausnahme des Binders ist der Aufbau der Triaxial-Gelege identisch. In Abbildung 5.6 sind die ermittelten Temperaturgradienten $\Delta T_{\text{Oberseite/Unterseite}}$ an den vier Messstellen beider Preformen dargestellt. Es ist keine Tendenz erkennbar. Demnach hat der Binder bei den untersuchten Faserhalbzeugen keinen nennenswerten Einfluss auf den Temperaturgradienten $\Delta T_{\text{Oberseite/Unterseite}}$.

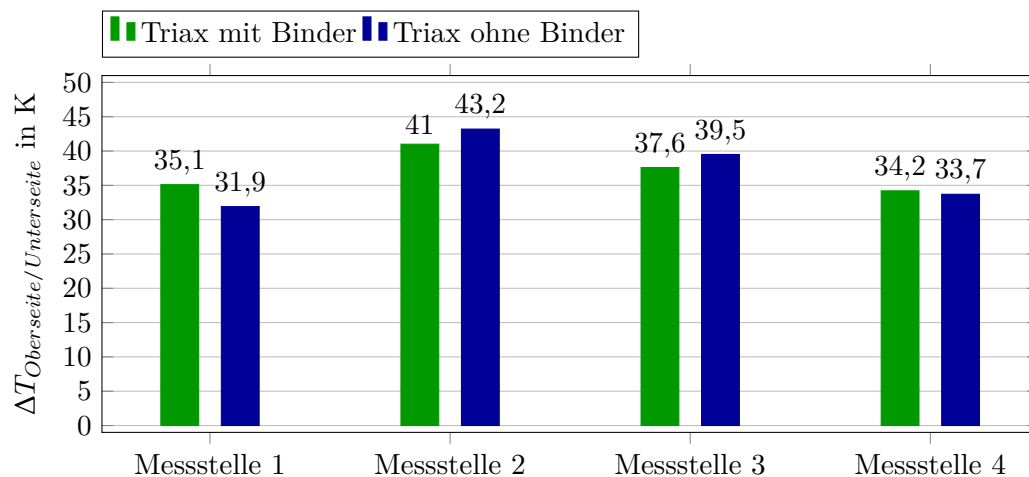


Abbildung 5.6: Einflussparameter: Binder
(zwei 12-Lagen-Preformen, vorkompaktiert)

5.2 Temperaturverlauf in Dickenrichtung

Um von Oberflächentemperaturen auf Temperaturen innerhalb von Preformen zurück-schließen zu können, ist die Kenntnis des Temperaturverlaufs in Dickenrichtung von elementarer Bedeutung.

5.2.1 Versuchsaufbau

Es wird eine 24-Lagen-Preform, bestehend aus Biax mit Binder, untersucht. Um eine möglichst genaue Auflösung des Temperaturverlaufs zu erhalten, werden auf Ober- und Unterseite sowie in alle Zwischenschichten Thermoelemente eingenäht. Die Temperaturen auf Ober- und Unterseite werden außerdem mit IR-Sensoren erfasst. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Der auf die Unterseite gerichtete IR-Sensor ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht abgebildet.

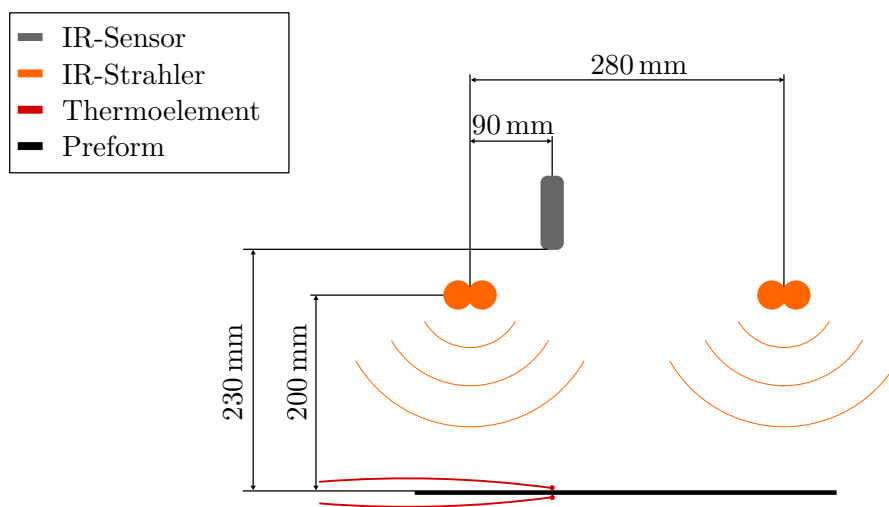


Abbildung 5.7: Versuchsaufbau: Temperaturverlauf in Dickenrichtung

Vor der Versuchsdurchführung wird eine theoretische Betrachtung durchgeführt und es werden daraus Erwartungen entwickelt. Diese Erwartungen werden anschließend mit den Versuchsergebnissen verglichen. Um die Reproduzierbarkeit der Untersuchung zu demonstrieren, werden alle Versuche in diesem Unterkapitel zehnfach durchgeführt.

5.2.2 Theoretische Überlegung und Erwartungen

Unter der Annahme, dass Kohlenstofffasern Infrarotstrahlung bereits nach wenigen Zehntelmillimetern absorbieren, wird lediglich die Oberfläche durch Infrarotstrahlung erwärmt. Der Wärmetransport durch die Preform hindurch erfolgt durch Wärmeleitung (vgl. Kap. 2.2.5). Bei einer stationären Temperatur innerhalb der Preform kann dies auf das thermodynamische Modell der stationären, eindimensionalen Wärmeleitung durch eine ebene Platte zurückgeführt werden (siehe Abb. 5.8). In der Abbildung liegt auf der linken Seite eine höhere Temperatur vor als auf der rechten, weshalb dieser der Index w für *warm* und der rechten Seite der Index k für *kalt* zugewiesen wird. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik kann Wärme nur von warm zu kalt fließen, weshalb die spezifischen Wärmeströme \dot{q}_w und \dot{q}_k in Richtung abnehmender Temperatur fließen [24, S. 27 - 33]. Da es innerhalb der ebenen Platte keine Wärmesenke gibt, ist $\dot{q}_w = \dot{q}_k = \dot{q}$.

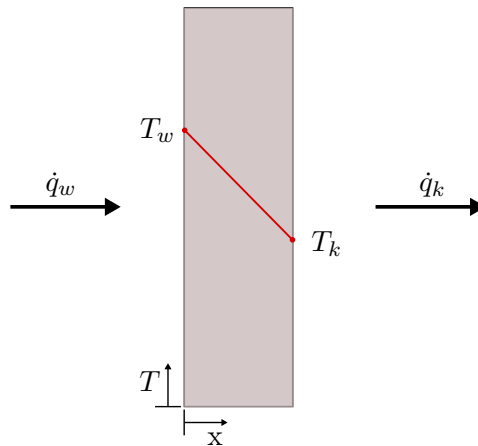


Abbildung 5.8: Stationäre, eindimensionale Wärmeleitung durch eine ebene Platte

Nach dem Fourierschen Gesetz hängt der spezifische Wärmestrom \dot{q} lediglich von dem Wärmeleitkoeffizienten Λ und dem Temperaturgradienten $\frac{dT}{dx}$ ab:

$$\dot{q} = -\Lambda \frac{dT}{dx}$$

Da der Wärmestrom \dot{q} sich innerhalb der Platte nicht ändern kann und es sich bei dem Wärmeleitkoeffizienten Λ um eine Materialkonstante handelt, muss der Temperaturgradient $\frac{dT}{dx}$ ebenfalls konstant sein. Das bedeutet, dass die Temperatur in positiver x -Richtung linear abfällt.

Auf Basis dieser theoretischen Überlegung ergeben sich folgende Erwartungen:

- Die höchste Temperatur liegt auf der bestrahlten Oberfläche
- Die Temperatur fällt linear in Dickenrichtung der Preform ab
- Die niedrigste Temperatur liegt auf der nicht bestrahlten Unterseite

5.2.3 Experimentelle Untersuchung und Ergebnisse

In Abbildung 5.9 ist der aus zehn Versuchen ermittelte Temperaturverlauf in Dickenrichtung einer 24-Lagen-Preform dargestellt. Die Temperaturmesswerte der einzelnen Versuche werden über einen Zeitraum von 20 Sekunden gemittelt. Aus den Temperaturmesswerten aller 10 Versuche werden die Mittelwerte und die jeweilige Standardabweichung gebildet.

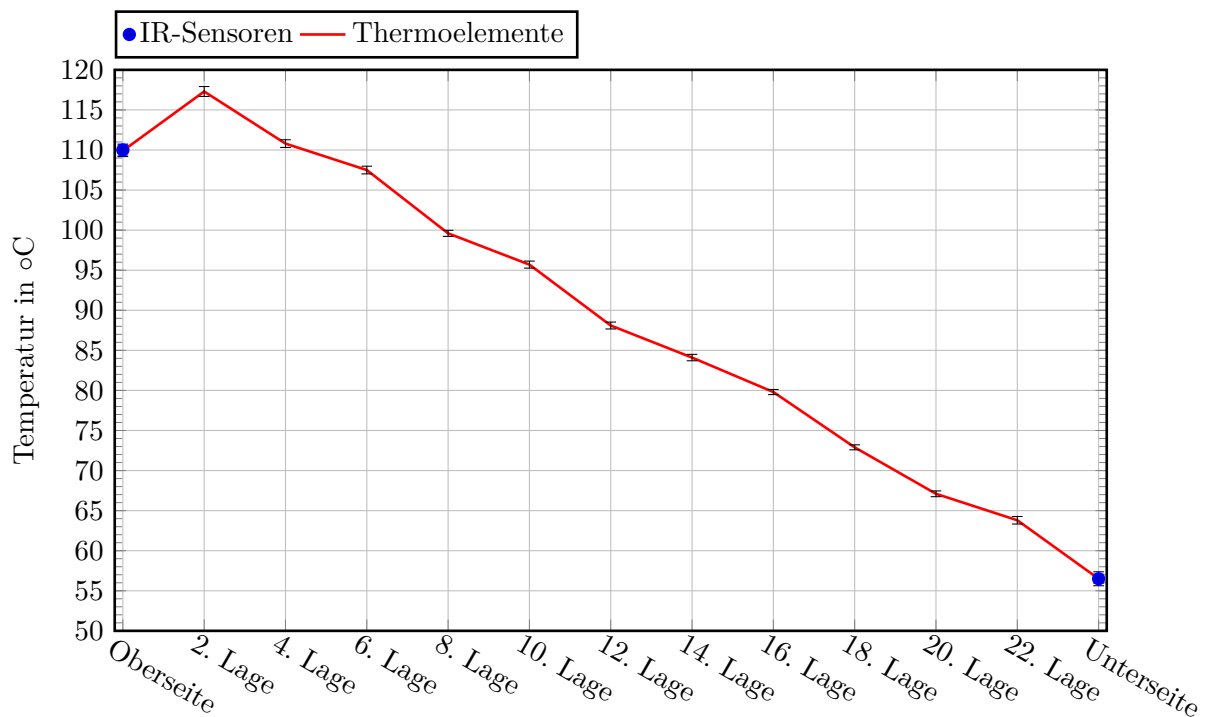


Abbildung 5.9: Temperaturverlauf in Dickenrichtung mit Thermoelementen in den Zwischenschichten

Die Standardabweichungen aller Temperaturmesswerte liegen unterhalb von 1 K, was die Reproduzierbarkeit der Versuche demonstriert. Außerdem weichen die mit Thermo-

elementen und IR-Sensoren ermittelten Temperaturmesswerte auf Ober- und Unterseite um weniger als 0,5 K voneinander ab. Diese Abweichung liegt innerhalb der Messgenauigkeit der Temperaturmesssensoren (vgl. Kap. 3.2).

Entgegen der Erwartung liegt die höchste Temperatur nicht auf der bestrahlten Oberseite, sondern in der zweiten Lage der Preform. Zwischen Oberseite und zweiter Lage liegt ein negativer Temperaturgradient vor. Die Temperatur in der vierten Lage ist ebenfalls höher als die Temperatur auf der Oberseite. Zwischen zweiter Lage und Unterseite ist ein Temperaturabfall zu erkennen, welcher als linear beschrieben werden kann. Demnach erfolgt die Wärmeleitung durch die Preform ab der zweiten Lage wie erwartet nach dem thermodynamischen Modell der stationären, eindimensionalen Wärmeleitung. Die niedrigste Temperatur liegt wie erwartet auf der Unterseite der Preform vor.

Für den negative Temperaturgradienten zwischen Oberseite und zweiter Lage kann lediglich ein Erklärungsansatz genannt werden. Die anfangs getroffene Annahme, dass die Infrarotstrahlung auf der Oberseite absorbiert wird und der Wärmetransport durch die Preform mittels Wärmeleitung erfolgt, kann falsch sein. Der negative Temperaturgradient spricht dafür, dass der maximale Wärmeeintrag nicht auf der Oberfläche, sondern innerhalb der Preform im Bereich der zweiten Lage erfolgt. Laut Ströhlein wird Infrarotstrahlung bereits nach wenigen Zehntelmillimetern von Kohlenstofffasern absorbiert [11, S. 27]. Eine Schicht Biax hat allerdings nur eine Dicke von lediglich 0,4 mm. Über die Eindringtiefe der Infrarotstrahlung gibt es auch nach Anfrage bei der Forschungs- und Entwicklungsabteilung des Herstellers der IR-Strahler keine Angabe.

Im Anhang A.2.1 sind die Temperaturverläufe in Dickenrichtung von drei 12-Lagen-Preformen dargestellt, welche im Rahmen der Untersuchungen aus Kapitel 5.1 aufgenommen wurden. Diese Verläufe gleichen dem Verlauf aus Abbildung 5.9 qualitativ.

Um den Einfluss der in die Zwischenschichten eingebrachten Thermoelemente abzuschätzen, wird eine weitere 24-Lagen-Preform aus Biax mit Binder aufgebaut. Bei diesen Versuchen werden keine Thermoelemente in die Zwischenschichten eingebracht. Die Ober- und Unterseitentemperaturen werden mit jeweils einem Thermoelement und einem IR-Sensor bestimmt. Es werden wieder zehn Versuche durchgeführt und daraus Mittelwerte und Standardabweichungen gebildet.

Die Temperaturmesswerte von Thermoelement und IR-Sensor weichen auf der Oberseite um 1 K und auf der Unterseite um 1,1 K voneinander ab. Diese Abweichungen liegen innerhalb der Messungenauigkeit der Temperaturmesssensoren (vgl. Kap. 3.2). Die Standardabweichung aller Temperaturmesswerte liegt innerhalb von 1 K.

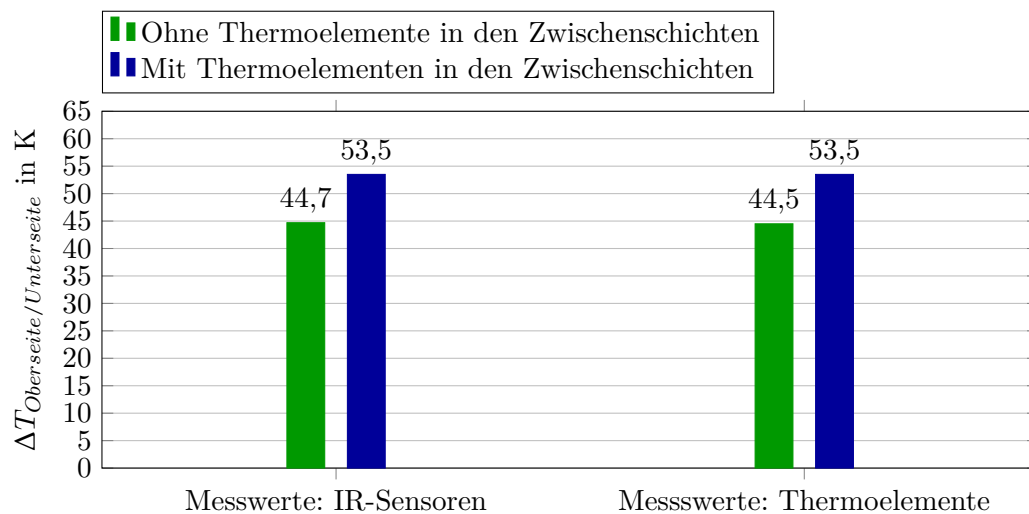


Abbildung 5.10: Vergleich des Temperaturgradienten mit Thermoelementen und ohne Thermoelemente in den Zwischenschichten

Der Temperaturgradient zwischen Ober- und Unterseite ist bei der Preform ohne Thermoelementen in den Zwischenschichten ca. 9 K geringer als bei der Preform mit Thermoelementen in den Zwischenschichten (siehe Abb. 5.10). Insgesamt werden elf Thermoelemente in die Zwischenschichten eingebracht. Damit erhöht in dieser Untersuchung ein durch Vernähen eingebrachtes Thermoelement den Temperaturgradienten um weniger als 1 K. Der Einfluss von vernähten Thermoelementen in Zwischenschichten wird deshalb als gering bewertet.

5.3 Zweiseitige Bestrahlung

Bei den bisherigen Untersuchungen wurden Preformen einseitig mit Infrarot bestrahlt. Der Temperaturverlauf aus Abbildung 5.9 zeigt, dass eine Binderaktivierung mit einseitiger Bestrahlung bei 24-Lagen-Preformen nicht möglich ist. Außerdem ist für die Binderaktivierung in einem kontinuierlichen Preforming-Prozess ein möglichst hoher Energieeintrag pro Fläche erstrebenswert, da so die notwendige Zeit für die Binderaktivierung reduziert werden kann. Die einfachste Methode, den Energieeintrag zu erhöhen, ist die

zweiseitige Bestrahlung. Deshalb wird die zweiseitige Bestrahlung exemplarisch an einer 24-Lagen-Preform, bestehend aus Biax mit Binder, untersucht und auf ihre Eignung zur Binderaktivierung überprüft.

5.3.1 Versuchsaufbau

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Die Bestrahlung erfolgt wie in den bisherigen Untersuchungen mit zwei IR-Strahlern. Diese sind jedoch nicht mehr nebeneinander über der Preform angeordnet, sondern jeweils einer oberhalb und unterhalb der Preform. In die Zwischenschichten der Preform sind Thermoelemente durch Vernähen eingebracht. Oberflächentemperaturen werden mit IR-Sensoren und vernähten Thermoelementen gemessen. Die Versuche in diesem Unterkapitel werden jeweils dreifach durchgeführt. Da die ermittelten Temperaturverläufe der einzelnen Versuche gut übereinstimmen, wird nur ein Temperaturverlauf dargestellt. Die anderen Temperaturverläufe sind dem Anhang A.2.5 zu entnehmen.

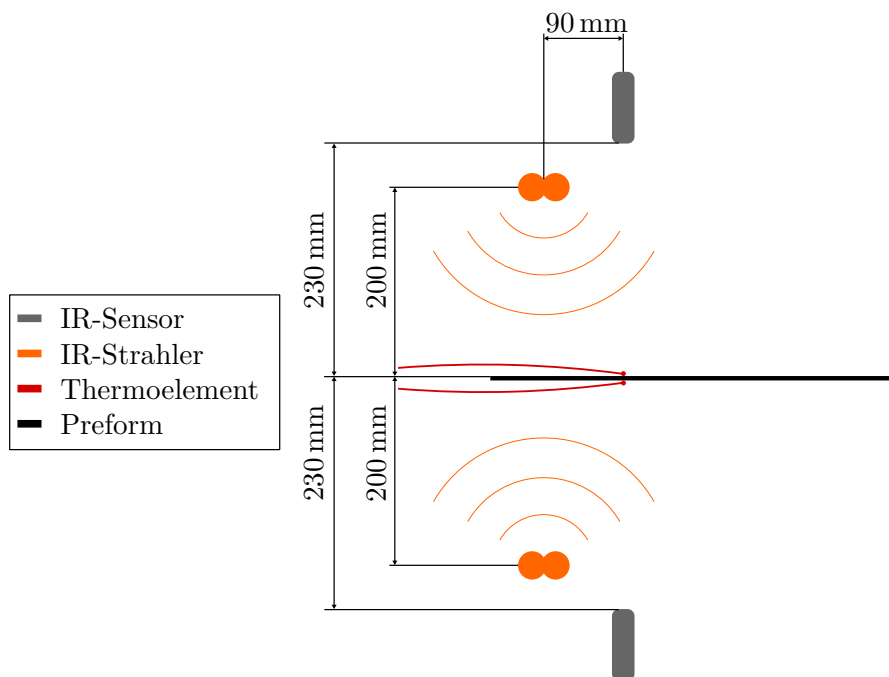


Abbildung 5.11: Versuchsaufbau: Zweiseitige Bestrahlung

5.3.2 Experimentelle Untersuchung und Ergebnisse

Der ermittelte Temperaturverlauf in Dickenrichtung der Preform ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Die Abweichung zwischen den durch Thermoelemente und IR-Sensoren ermittelten Oberflächentemperaturen beträgt auf der Oberseite 0,6 K und auf der Unterseite 2,3 K. Diese Abweichungen liegen innerhalb der Messungenauigkeit der Temperatursensoren (vgl. Kap. 3.2).

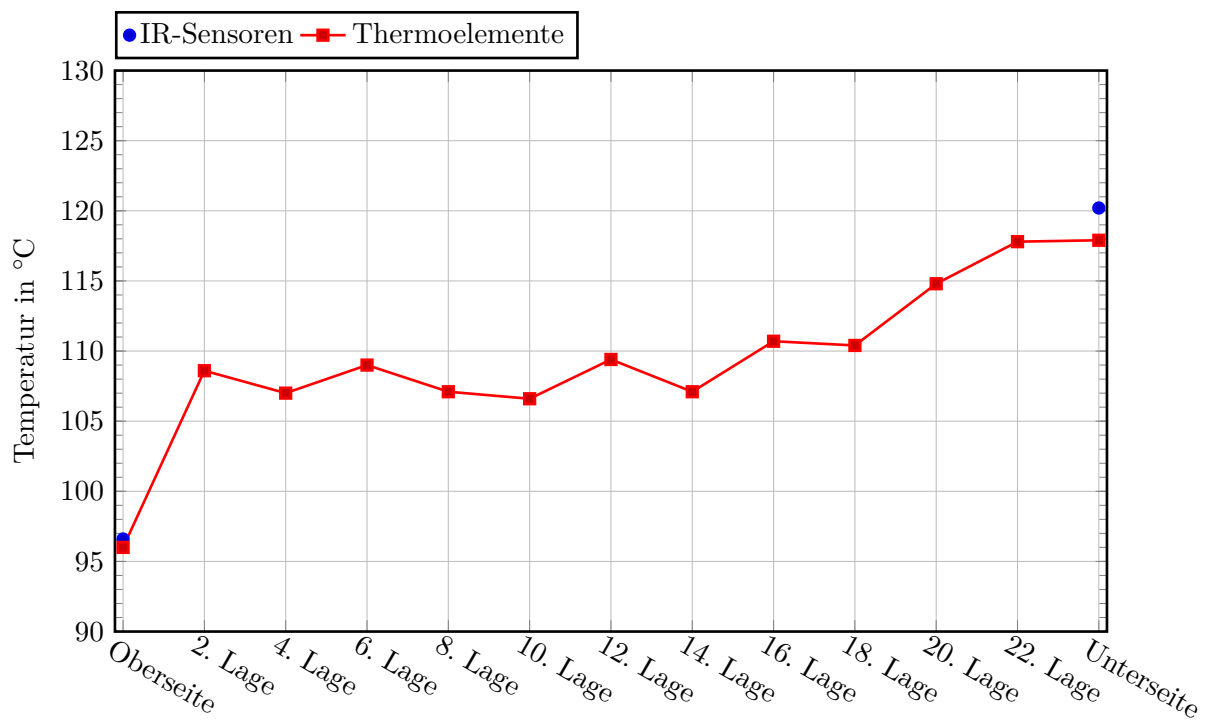


Abbildung 5.12: Temperaturverlauf in Dickenrichtung bei zweiseitiger Bestrahlung

Auffällig ist, dass die Temperatur auf der Oberseite 21,9 K niedriger ist als auf der Unterseite, obwohl die IR-Strahler mit derselben Leistung von $P = 10\%$ betrieben werden. Um auszuschließen, dass die Ursache der Temperaturdifferenz die IR-Strahler sind, werden die Positionen der Strahler getauscht und die Versuche erneut durchgeführt. Dabei ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den neu ermittelten Temperaturverläufe und den Verläufen bei nicht getauschten IR-Strahlern (siehe Anhang A.2.5). Die IR-Strahler bewirken nicht den Temperaturunterschied zwischen Ober- und Unterseite.

Die Temperaturdifferenz hat ihre Ursache in der Wärmeabgabe durch freie Konvektion (vgl. Kap. 2.2.2). An der Oberseite kann sich die erwärmte Luft von der Preform ablösen und aufsteigen. An der Unterseite drängt die erwärmte Luft gegen die Preform und die Luftströmung liegt an der Preform an. Deshalb ist die Wärmeabgabe durch freie Konvektion auf der Unterseite geringer als auf der Oberseite. Infolgedessen kommt es zu einer höheren Temperatur auf der Unterseite.

Mit Ausnahme der Randbereiche schwanken die Temperaturen in den Zwischenschichten zwischen 106,6 °C und 110,7 °C. Anders als bei der einseitig bestrahlten 24-Lagen-Preform ist keine Fließrichtung eines Wärmestroms erkennbar (siehe Abb. 5.9). Mit Ausnahme der Oberseite liegen die Temperaturen in der Preform oberhalb 100 °C. Da der Binder auf die Unterseite jedes Biax-Geleges aufgebracht ist, liegt die Temperatur in allen für die Binderaktivierung relevanten Schichten oberhalb der Schmelztemperatur des Binders. Die zweiseitige Bestrahlung von Preformen mit Infrarot eignet sich demnach prinzipiell für die Binderaktivierung in kontinuierlichen Preforming-Prozessen.

5.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Thermalverhalten

Die Untersuchungen zu Einflussparametern auf den Temperaturgradienten zwischen Oberseite und Unterseite zeigen, dass dieser durch eine Vorkompaktierung gesenkt wird. Die Lagenzusammenstellung und der Binder zeigen keinen Einfluss. Bei den untersuchten Preformen mit einer Lagenanzahl zwischen 3 und 12 Lagen ist ein linearer Anstieg des Temperaturgradienten mit der Lagenanzahl von ca. 2,5 K pro Lage zu beobachten. Demnach ist der Temperaturgradient zwischen Ober- und Unterseite vor allem von der Lagenanzahl abhängig und kann durch eine Vorkompaktierung gesenkt werden.

Die Untersuchungen zum Temperaturverlauf in Dickenrichtung zeigen, dass ein Rückschluss von Oberflächentemperaturen auf Zwischenschichttemperaturen bei einseitiger Bestrahlung möglichst ist. Die niedrigste Temperatur einer Preform liegt auf der nicht bestrahlten Unterseite vor. Alle Temperaturen innerhalb der Preform liegen oberhalb dieser Temperatur. Erreicht die nicht bestrahlte Unterseite die Schmelztemperatur des Binders, liegen auch die Temperaturen in den Zwischenschichten oberhalb der Schmelztemperatur des Binders. So lässt sich durch Messung der Oberflächentemperaturen be-

werten, ob der Binder vollständig aktiviert wird. Außerdem liegt die höchste Temperatur nicht zwangsläufig auf der bestrahlten Oberseite vor. Da die Infrarotstrahlung nicht vollständig auf der Oberfläche absorbiert wird, führt diese auch innerhalb der Preform zu einer Erwärmung. Während der Erwärmung einer Preform sollte deshalb die Temperatur auf der bestrahlten Oberseite ca. 15 K unter der maximal zulässigen Temperatur des Faserhalbzeugs gehalten werden. So wird eine Überhitzung des Fasermaterials in den ersten Zwischenschichten vermieden.

Die Versuche zur zweiseitigen Bestrahlung demonstrieren die Eignung der Infrarotstrahlung zur Binderaktivierung bei Preformen mit dem untersuchten Aufbau aus bis zu 24 Lagen. In allen Zwischenschichten wird eine Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur des Binders von 100 °C erreicht. Der Temperaturunterschied zwischen Ober- und Unterseite erklärt sich durch die unterschiedlich große Wärmeabgabe durch Konvektion an Ober- und Unterseite. Um in zukünftigen Untersuchungen und Prototypenanlagen ähnliche Temperaturen auf Ober- und Unterseite zu erreichen, wird empfohlen die IR-Strahler auf der Unterseite mit einer geringeren Leistung als auf der Oberseite zu betreiben. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Preform vollständig durchgeheizt ist, kann ein Rückschluss von Oberflächen- auf Zwischenschichttemperaturen erfolgen. In diesem Fall liegt die niedrigste Temperatur auf der Oberseite vor.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war das Erarbeiten eines grundlegenden Verständnisses für das Thermalverhalten von trockenen Mehrlagenpreformen. Insbesondere sollte bewertet werden, inwieweit berührungslos ermittelte Oberflächentemperaturen einen Rückschluss auf erreichte Zwischenlagentemperaturen ermöglichen. Außerdem sollten Temperaturmessensoren hinsichtlich ihrer Genauigkeit und ihrer Rückwirkung auf die zu messenden Preformen bewertet werden. Zur Erwärmung der Preformen wurden IR-Strahler eingesetzt. Die untersuchten Faserhalbzeuge waren vier Multiaxialgelege (MAG) aus Kohlenstofffasern.

In der Untersuchung aus Kapitel 4 wurde gezeigt, dass die simultane Verwendung von IR-Strahlern und IR-Sensoren keinen Messfehler erzeugt. Bei der Verwendung von Klebestreifen zum Befestigen von Thermoelementen wurde festgestellt, dass die Klebestreifen zu einer örtlichen Temperaturerhöhung von ca. 10 K bis 15 K auf der Preformoberfläche führen können. Auch wenn der Klebestreifen nicht über die Messspitze des Thermoelements geklebt war, beeinflusste er das Messergebnis. Das Vernähen von Thermoelementen bewirkte lediglich eine örtliche Temperaturerhöhung von ca. 2 K und wies damit eine deutlich geringere Rückwirkung auf.

Die Versuche aus Kapitel 5.1 ergaben, dass eine Vorkompaktierung den Temperaturgradienten um bis zu 15 % senken konnte. Die Lagenzusammenstellung und der Binder zeigten keinen Einfluss. Bei Preformen mit einer Lagenanzahl zwischen 3 und 12 Lagen wurde ein nahezu linearer Anstieg des Temperaturgradienten mit der Lagenanzahl beobachtet.

In Kapitel 5.2 wurde der Temperaturverlauf in Dickenrichtung bei einseitiger Bestrahlung anhand einer 24-Lagen-Preformen untersucht. Dabei wurde beobachtet, dass die Infrarotstrahlung nicht vollständig auf der Oberfläche absorbiert wird, sondern auch innerhalb der Preform zu einer Erwärmung führt. Anhand der Untersuchung konnte gezeigt werden, dass ein Rückschluss von Oberflächentemperaturen auf Zwischenlagen-

temperaturen bei einseitiger Bestrahlung möglich ist. Die niedrigste Temperatur einer Preform liegt auf der nicht bestrahlten Unterseite vor. Erreicht die Unterseite eine Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur des Binders, so liegt die Temperatur auch in allen Zwischenschichten oberhalb der Schmelztemperatur des Binders.

Abschließend wurde in Kapitel 5.3 die Eignung der zweiseitigen Bestrahlung zur Binderaktivierung an einer 24-Lagen-Preform demonstriert. In allen Zwischenschichten wurde die Schmelztemperatur des Binders erreicht. Obwohl die IR-Strahler oberhalb und unterhalb der Preform denselben Abstand zur Preform hatten und mit derselben Leistung betrieben wurden, wies die Oberseite eine deutlich geringere Temperatur auf als die Unterseite. Diese Beobachtung wurde auf die unterschiedlich großen Wärmeabgaben an Ober- und Unterseite durch freie Konvektion zurückgeführt. Unter der Annahme einer vollständig durchgeheizten Preform, ist ein Rückschluss von Oberflächentemperaturen auf Zwischenlagentemperaturen möglich. In diesem Fall liegen alle Temperaturen innerhalb der Preform zwischen der Ober- und Unterseitentemperatur.

Bei allen Versuchen wurde eine gute Übereinstimmung von Temperaturmesswerten erreicht, welche simultan mit IR-Sensoren und Thermoelementen ermittelt wurden. Dies zeigt, dass kontaktbehaftete Temperaturmessmittel durch kontaktlose Temperaturmessmittel ersetzt werden können. Aufgrund ihres rückwirkungsfreien Messprinzips sind kontaktlose Temperaturmessmittel sogar deutlich besser für die Temperaturmessung an Mehrlagenpreformen geeignet, als kontaktbehaftete Messmittel.

7 Ausblick

Die Erkenntnisse dieser Arbeit können eine Grundlage für weitere Untersuchungen bilden. Die Untersuchung des Temperaturverlaufs zeigte, dass kurzwellige Infrarotstrahlung auch innerhalb von Preformen zu einer Erwärmung führt. Darauf aufbauend könnten Untersuchungen anschließen, um die Eindringtiefe von Infrarotstrahlung zu bestimmen.

Bei der zweiseitigen Bestrahlung mit Infrarot wurde eine Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite festgestellt, welche auf die unterschiedliche Wärmeabgabe durch freie Konvektion zurückgeführt wurde. Es wird angenommen, dass durch eine vertikale statt horizontale Anordnung der Preform die Wärmeabgaben angeglichen werden können. Gegenstand weiterer Untersuchungen kann die Überprüfung dieser Annahmen mit Versuchen darstellen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Preformen bei einer stationären Temperatur untersucht und die zeitliche Komponente bewusst nicht betrachtet, um die Anzahl an Einflussfaktoren gering zu halten. Für den weiteren Ausbau des Verständnisses des Thermalverhaltens von Mehrlagenpreformen und für den Rückschluss von Oberflächen- auf Zwischenlagentemperaturen bei zweiseitiger Bestrahlung ist eine Betrachtung der zeitlichen Komponente des Thermalverhaltens sinnvoll. Die Bestimmung der Zeit, welche nötig ist, um den Binder vollständig zu aktivieren, ist relevant. Sie gibt die Auslegung der Heizstrecke und die Fördergeschwindigkeit in einer kontinuierlichen Preforming-Anlage entscheidend vor. Aber auch der Zeitraum, bis der Binder wieder erstarrt, ist von Bedeutung, da die Preform in dieser Zeit umgeformt werden muss. Bei der Betrachtung der zeitlichen Komponente gibt es eine Vielzahl von Einflussfaktoren, wie zum Beispiel den Preformaufbau, die Anordnung der IR-Strahler und deren Leistung, welche viel Raum für zukünftige Untersuchungen bieten.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Binderaktivierung in einem kontinuierlichen Rollumformprozess	3
2.1	Schematische Darstellung eines Multiaxialgeleges nach [5]	4
2.2	Prozessschritte RTM [6, S. 391]	5
2.3	Prinzip der Fertigung gekrümmter Profile [8, S.4]	7
2.4	VTP-NG Anlage: Leitbleche mit integrierter Bindererwärmung	8
2.5	Preformgeometrie nach [12, S. 88]	11
2.6	Prinzip eines Thermoelements	14
3.1	Vergleich: Messfleck eines IR-Sensors und Messpunkt eines Thermoelements	19
3.2	Drei Beispiele einer 6-Lagen-Preform in Schnittansicht	21
3.3	Versuchsstand	22
4.1	Versuchsaufbau: Einfluss von IR-Strahlern auf IR-Sensoren	24
4.2	Temperaturverlauf: Einfluss von IR-Strahlern auf IR-Sensoren	24
4.3	Versuchsaufbau: Befestigungsarten für Thermoelemente auf Preformen . .	25
4.4	Ungestörte Preform	26
4.5	Befestigung eines Thermoelements mit 25 mm x 25 mm Klebestreifen . . .	27
4.6	Temperaturmesswerte: Befestigung eines Thermoelements mit 25 mm x 25 mm Klebestreifen mit Lufteinschlüssen	29
4.7	Temperaturmesswerte: Befestigung eines Thermoelements mit 25 mm x 25 mm Klebestreifen ohne Lufteinschlüsse	30
4.8	Befestigung eines Thermoelements mit 5 mm x 5 mm Klebestreifen	31
4.9	Temperaturmesswerte: Befestigung eines Thermoelements mit 5 mm x 5 mm Klebestreifen	31
4.10	Befestigung eines Thermoelements durch Einstecken	32
4.11	Temperaturmesswerte: Befestigung eines Thermoelements durch Einstecken	33
4.12	Befestigung eines Thermoelements mit einem Nähfaden	34
4.13	Temperaturmesswerte: Befestigung eines Thermoelements mit einem Näh- faden	34

4.14	Abweichungen von Temperaturmesswerten bei den Befestigungsarten . . .	36
5.1	Versuchsaufbau: Einflussparameter auf den Temperaturgradienten	39
5.2	Draufsicht: Messanordnung	40
5.3	Einflussparameter: Lagenanzahl (vier Preformen bestehnd aus Triax mit Binder, vorkompaktiert)	41
5.4	Einflussparameter: Vorkompaktierung (zwei 12-Lagen-Preformen bestehend aus Biax mit Binder)	42
5.5	Einflussparameter: Lagenzusammenstellung (zwei 12-Lagen-Preformen, vorkompaktiert)	43
5.6	Einflussparameter: Binder (zwei 12-Lagen-Preformen, vorkompaktiert) . .	44
5.7	Versuchsaufbau: Temperaturverlauf in Dickenrichtung	45
5.8	Stationäre, eindimensionale Wärmeleitung durch eine ebene Platte	46
5.9	Temperaturverlauf in Dickenrichtung mit Thermoelementen in den Zwischenschichten	47
5.10	Vergleich des Temperaturgradienten mit Thermoelementen und ohne Thermoelemente in den Zwischenschichten	49
5.11	Versuchsaufbau: Zweiseitige Bestrahlung	50
5.12	Temperaturverlauf in Dickenrichtung bei zweiseitiger Bestrahlung	51

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht über die verwendeten Kohlenstofffaserhalbzeuge	20
-----	--	----

Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2016-10-18-02.aspx>. – Zuletzt aufgerufen am 17.05.2017
- [2] <http://www.iata.org/policy/environment/Pages/climate-change.aspx>. – Zuletzt aufgerufen am 17.05.2017
- [3] WIEDEMANN, Martin: CFK-Status der Anwendung und Produktionstechnik im Flugzeugbau. (2009)
- [4] NEITZEL, Manfred ; MITSCHANG, Peter ; BREUER, Ulf: *Handbuch Verbundwerkstoffe*. Hanser Fachbuchverlag, 2014
- [5] MAXXL2 https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Multiaxial_Fabrics.svg. – Zuletzt aufgerufen am 17.05.2017
- [6] KU, AVK-Industrievereinigung V.: *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. Springer-Verlag, 2014
- [7] PUROL, Holger: *Entwicklung kontinuierlicher Preformverfahren zur Herstellung gekrümmter CFK-Versteifungsprofile*, Diss., 2011
- [8] BORGWARDT, Henrik ; STAHL, Arne ; NEEF, Sandra: Advantages and limits of non-crimp-fabric-material in automated preforming facilities with a new roll-forming process. (2014)
- [9] VDI: *VDI-Wärmeatlas*. Springer-Verlag GmbH, 2013
- [10] BORGWARDT, Henrik ; STRÖHLEIN, Tobias ; KRZYWINSKI, S: Entwicklung einer Anlage zur kontinuierlichen Fertigung von Preformprofilen mit variabler Steghöhe aus Faserverbundwerkstoffen / DLR. – Forschungsbericht
- [11] STRÖHLEIN, Tobias: *Volumetrische Erwärmung von Kohlenstofffaserhalbzeugen*, DLR, Diss., 2012
- [12] HEMMEN, Alexander: *Direktbestromung von Kohlenstofffasern zur Minimierung von Zykluszeit und Energieaufwand bei der Herstellung von Karbonbauteilen*, Universität Augsburg, Diss., 2016

- [13] HABENICHT, Gerd: *Kleben*. Springer Berlin Heidelberg, 2008
- [14] SIEBENPFEIFFER, Wolfgang: Leichtbau-Technologien im Automobilbau. In: *Werkstoffe—Fertigung—Konzepte*. Wiesbaden (2014)
- [15] HOFFMANN, Jörg: *Handbuch der Messtechnik*. Hanser Fachbuchverlag, 2012
- [16] PARTHIER, Rainer: *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure; mit 31 Tabellen*. Springer-Verlag, 2009
- [17] TRÄNKLER, Hans-Rolf ; FISCHERAUER, Gerhard: *Das Ingenieurwissen: Messtechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 2014
- [18] OPTRIS-GMBH: *Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung*. – Firmenbroschüre, zuletzt geprüft am 29.05.2017
- [19] *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*. Springer-Verlag GmbH, 2014
- [20] TRÄNKLER, Hans-Rolf ; REINDL, Leonhard M.: *Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [21] http://www.hexion.com/epoxyphenoliccomposites/automotive/our_products/. – Zuletzt aufgerufen am 05.06.2017
- [22] <https://www.nitto.com/eu/de/products/group/maskingtape/paint/028/>. – Zuletzt aufgerufen am 17.05.2017
- [23] ILLIES, Oliver ; JÜRGENS, Jan-Patrick: Simulation der thermischen und mechanischen Eigenschaften von Verbundwerkstoffen.
- [24] WEIGAND, Bernhard ; KÖHLER, Jürgen ; WOLFERSDORF, Jens von: Die Hauptsätze der Thermodynamik. In: *Thermodynamik kompakt*. Springer, 2013
- [25] HERAEUS-GMBH: *Infrarot-Strahler für industrielle Prozesse*. – Firmenbroschüre, zuletzt geprüft am 29.05.2017
- [26] HERAEUS-GMBH: *Betriebsanleitung Thyristor-Leistungsteller HERATRON CB1x25 CB3x25*
- [27] OPTRIS-GMBH: *Optris CS LT*. – Datenblatt Infrarotsensoren, zuletzt geprüft am 29.05.2017

A Anhang

A.1 Datenblätter

A.1.1 Infrarotstrahler

Technische Daten				
Zwillingsrohrstrahler	kurzwellig	schnell mittelwellig	mittelwellig	Carbon
Max. Leistung W/cm	< 200	80	18/20/25*	60
Max. beheizte Länge mm	6400/2400*	6400/2400*	1500/2000/6500*	3000
Querschnitt mm	34 x 14	34 x 14	18 x 8	34 x 14
	23 x 11	23 x 11	22 x 10	
			33 x 15	
Filament-Temperatur °C	1800–2400	1400–1800	800– 950	1200
Wellenlänge µm	1.0–1.4	> 1.4	2.4–2.7	2
Max. Flächenleistung kW/m²	200	150	60	110
Reaktionszeit s	1	1–2	60-90	1–2
* Abhängig vom Querschnitt				

Goldene 8 Standardstrahler						
	Leistung	Spannung	beheizte Länge	Gesamtlänge	Strahlertyp	Artikelnummer
	[Watt]	[Volt]	[mm]	[mm]		
Mittelwelle	500	230	300	400	B	09752439
	1000	230	500	600	B	09755167
	2000	230	800	900	B	09755054
	2500	230	1000	1100	B	09755255
	3250	230	1300	1420	B	09753187
	3750	230	1500	1600	B	09754585
	4100	400	1700	1800	B	09754863
	4500	400	1800	1920	B	09754783
	5750	400	2300	2400	B	09756083
	6250	400	2500	2600	B	09753874
	2500	230	1200	1300	C	09753923
	Kurzwelle	3000	400	1000	1100	A
	600	115	80	145	B	09751713
	1500	230	200	300	B	09751751
	1200	230	340	405	B	09751741
	3000	400	500	600	B	09751740

Quelle: [25, S. 9]

A.1.2 Leistungssteller

CB		1x25 (8005 5838)	3x25 (8005 5839)
Abmessungen	Breite=Höhe / Tiefe	380 mm / 210 mm	500 mm / 210 mm
Laststrom		25 A	
Nennspannung		230 V/400 V/50 Hz/N/PE	
Nennleistung		5,75 kW@230V 10 kW@400V	17,25 kW@230V 30 kW@400V
Nennfrequenz		50 Hz / 60 Hz	
Stellbereich, linear		0/10...100 %	
Steuerspannung, extern		0...10 V DC	
Umgebungstemperatur		max. 40 °C	
Schutzart		IP 54	
Vorsicherung, extern		35 A	50 A

Quelle: [26, S. 5]

A.1.3 Infrarotsensoren

A.1.3.1 Datenblatt



optris® CS LT

Einstieg in Mehrfach-Sensorinstallationen:
Intelligent, sicher und einfach für -40 bis 1030°C



VORTEILE

- Temperaturbereich von -40°C bis 1030°C
- Einstellzeit: 25 ms
- Optische Auflösung: 15:1
- Grüne LED als Alarmsignalisierung, Zielhilfe, Selbstdiagnose oder Temperatur-Code Anzeige
- Einsetzbar bis 80°C Umgebungstemperatur ohne Kühlung
- Vielfältige Ausgänge wählbar: 0-10 V oder 0-5 V frei skalierbar oder Thermoelement Typ K, Alarmausgang, Digitalausgang
- USB-Schnittstelle und direktes, serielles 9,6 kBaud Interface
- Spannungsversorgung: 5-30 V DC

Allgemeine Parameter	
Schutzklasse	IP 63
Umgebungstemperatur	-20°C bis 80°C
Lagertemperatur	-20°C bis 85°C
Relative Luftfeuchtigkeit	10 - 95%, nicht kondensierend
Vibration	IEC 68-2-6: 3 G, 11-200 Hz, jede Achse
Schock	IEC 68-2-27: 50 G, 11 ms, jede Achse
Gewicht	58 g

Elektrische Parameter	
Ausgang/analog	Wählbar: 0-5 V oder 0-10 V frei skalierbar oder Thermoelement Typ K / Alarm mit einstellbaren Spannungspegeln
Alarmausgang	0-30 V/50 mA (open collector)
3-stufiger Alarmausgang	einstellbare Schwellwerte und Spannungspegel für: kein Alarm, Voralarm, Alarm
Ausgang/digital	uni/bidirektional, 9,6 kBaud, 0/3 V Pegel/USB optional
Eingang (0-10V)	programmierbarer Funktionseingang für externe Emissionsgradeinstellung/ Umgebungstemperaturkompensation, getriggerte Signalausgabe oder Peak-Hold-Funktion
LED-Funktionen	Alarmanzeige, automatische Zielhilfe, Selbstdiagnose, Temperaturanzeige (über Temp.-Code)
Kabellänge	1 m (Standard), 3 m, 8 m, 15 m
Spannungsversorgung	5-30 V DC
Stromverbrauch	4 mA (ohne LED)/10 mA

Messtechnische Parameter	
Temperaturbereich (skalierbar über Software)	-40°C - 1030°C
Spektralbereich	8 bis 14 µm
Optische Auflösung (90 % Energie)	15:1
CF-Vorsatzlinse (optional)	0,8 mm @ 10 mm
Systemgenauigkeit (bei Umgebungstemp. 23 ± 5°C)	± 1,5% oder ± 1,5°C ¹⁾
Reproduzierbarkeit (bei Umgebungstemp. 23 ± 5°C)	± 0,75% oder ± 0,75°C ¹⁾
Temperaturkoeffizient	± 0,05 K/K oder ± 0,05 % K ³⁾
Temperaturauflösung	0,1 K ²⁾
Einstellzeit (90%)	25 ms (einstellbar bis 999 s)
Emissionsgrad/Verstärkung (einstellbar über 0-10 V DC Eingang oder Software)	0,100 - 1,100
Transmissionsgrad (einstellbar über Software)	0,100 - 1,100
Signalverarbeitung (Parameter einstellbar über Software)	Maximal-, Minimalwerthaltung, Mittelwert; erweiterte Haltefunktionen mit Schwellwert und Hysterese
Software	optris Compact Connect

¹⁾ Objekttemperatur > 0°C; es gilt der jeweils größere Wert

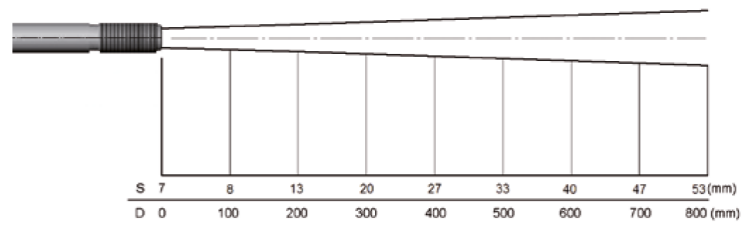
²⁾ bei Zeitkonstante von 100 ms und $T_{\text{obj}} = 25^\circ\text{C}$

³⁾ für Umgebungstemperaturen <18°C und >28°C; es gilt der jeweils größere Wert

Innovative Infrared Technology

A.1.3.2 Optischer Fokus

15:1 Optik



Quelle: [27, S. 2]

A.1.4 Wärmebildkamera



TECHNICAL SPECIFICATIONS

IMAGING PERFORMANCE

Field of view/min focus distance	25° x 19°/0.3 m
Thermal sensitivity	0.12°C at 25°C
Image frequency	50/60 Hz non-interlaced
Focus	Manual
Detector type	Focal Plane Array (FPA), uncooled microbolometer
	160 x 120 pixels, vanadium oxide
Spectral range	7.5 to 13 µm
Optical resolution	300:1

minimum diameter measurement
spot at 10 cm (with 45° lens)

IMAGE PRESENTATION

Video output	PAL or NTSC, standard RCA composite video
External display	2.5" colour LCD, 16K colors

MEASUREMENT

Temperature range	-20°C to +250°C, (-4°F to +482°F) up to +900°C optional
Accuracy	±2°C, ±2%
Repeatability	±1°C, ±1%
Measurement mode	3 movable spots, area max, area min, area average, color alarm above or below Palettes (iron, rainbow, B&W, B&W invers), auto-adjust (continuous/manual)
Menu controls	Date/time, temperature units °C/°F, language, scale, info field, LCD intensity (high/normal/low)
Set-up controls	Emissivity variable from 0.1 to 1.0, reflected ambient
Measurement corrections	

IMAGE STORAGE

Type	Built-in FLASH memory (up to 100 images)
File formats	Standard JPEG

LENSES (OPTIONAL)

2 x Telescope (12° x 9°/1.2 m)
0.5 Wide angle (45° x 34°/0.1 m)



adapt your camera
to EVERY situation

LASER LOCATOR™

Classification	Class 2
Type	Semiconductor AlGaInP Diode Laser: 1mW/635 nm red

BATTERY SYSTEM

Type	Li-Ion, rechargeable, field replaceable
Operating time	2 hours continuous operation. Display shows battery status
Charging system	In camera, AC adapter or 12 V from car (with optional Std. cable) 2 bay intelligent charger, 12 V AC adapter 90-260 V AC, 50/60 Hz, 12 V DC out 11-16 V DC
AC operation	Automatic shutdown and sleep mode (user selectable)
Voltage	
Power saving	

ENVIRONMENTAL SPECIFICATION

Operating temperature range	-15°C to +45°C (+5°F to +113°F)
Storage temperature range	-40°C to +70°C (-40°F to +158°F)
Humidity	Operating and storage 20% to 80%, non-condensing
Encapsulation	IP54 IEC 359
Shock	Operational: 25G, IEC 68-2-29
Vibration	Operational: 2G, IEC 68-2-6

PHYSICAL CHARACTERISTICS

Weight	700 g (1.5 lbs.), incl. battery with 25° lens
Size	265 mm x 80 mm x 105 mm (10.4" x 3.1" x 4.1")
Tripod Mounting	1/4" - 20
Cover case	Plastic and rubber

INTERFACES

USB	Image transfer to PC
RS-232 cable (optional)	Image transfer to PC
Video Output	Standard RCA composite video

ThermaCAM E4 includes:

IR camera, Carrying case, Power supply, Handstrap, Lens cap, ThermaCAM Connect™ Software,
USB cable, User manual, Power cord, Battery, Battery charger

SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE

© Copyright 2003, FLIR Systems, Inc. All other brand and product names are trademarks of their respective owners



FLIR Systems AB

World Wide Thermography Center
Rinkebyvägen 19 - PO Box 3
SE-182 11 Danderyd
Sweden
Tel.: +46 (0)8 753 25 00
Fax: +46 (0)8 753 23 64
e-mail: sales@flir.se
www.flir.com

FLIR Systems Ltd.

United Kingdom
Tel.: +44 (0)1732 220 011
e-mail: sales@flir.uk.com

FLIR Systems Co. Ltd.

Hong Kong
Tel.: +852 27 92 89 55
e-mail: flir@flir.com.hk

FLIR Systems GmbH

Germany
Tel.: +49 (0)69 95 00 900
e-mail: info@flir.de

FLIR Systems Sarl

France
Tel.: +33 (0)1 41 33 97 97
e-mail: info@flir.fr

FLIR Systems S.r.l.

Italy
Tel.: +39 02 39 09 121
e-mail: info@flir.it

FLIR Systems AB

Belgium
Tel.: +32 (0)3 287 87 11
e-mail: info@flir.be

www.flir.com



A.1.5 Faserhalbzeuge

A.1.5.1 Triax mit Binder

|||| TohoTenax |

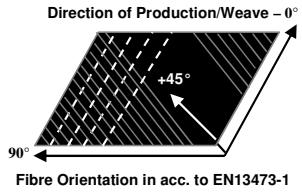
TEIJIN

Technical Data Sheet
Tenax® Dry Reinforcements Non-Crimp Fabric

Brand name	Tenax®
Production site	E (Europe)
Product family	DRNF
Product designation	PB1_15-V8_05-IMS65-TA7-0582-1270
Type of Textile	Triaxial Non-Crimp Fabric – Basic
Textile areal weight (incl. sizing, binder, toughener, stitching, etc.)	615 g/m² ± 30 g/m²
Carbon fibre areal weight (incl. sizing)	582 g/m² ± 29 g/m²

NCF detail construction

Layer	Material	Areal weight [g/m²]
7	Powder Binder EP 05311	15
6	Toughener TA1900c2	5
5	-45° Tenax®-E IMS65 E23 24K 830tex	194
4	Toughener TA1900c2	5
3	90° Tenax®-E IMS65 E23 24K 830tex	194
2	Toughener TA1900c2	5
1	+45° Tenax®-E IMS65 E23 24K 830tex	194

Stitching yarn	CoPA	2.0
Weave	Tricot	
Stitching length	2.2 mm	
roll dimension	Paper core: 152mm Fabric roll width: 1270mm Cutting width: 280mm Length: ca. 32m	

This material is a development product and subject to change.

The export or transfer of carbon fibre products can be subject to authorisation, depending on end-use and final destination.

A.1.5.2 Triax ohne Binder

Lagenaufbau:	$+45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}$
Flächengewicht:	3 Lagen mit je 194 g/m^2
Bindungsart:	Trikot
Garn:	TENAX-E IMS65 E23 24K 830 tex
Zwischenlagen:	3 Vlieslagen TA 1900c

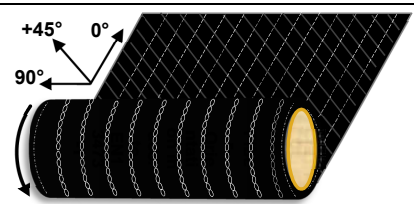
A.1.5.3 UD mit Binder

Bezeichnung:	Tenax-E DRWF-PB1-IMS65 E23 24K-UD-0194-0300
Lagenaufbau:	UD Woven Fabric (web)
Flächengewicht:	194 g/m^2
Garn:	TENAX-E IMS65 E23 24K 830 tex

Brand name	Tenax®
Production site	E (Europe)
Product family	DRNF
Product designation	PB11_07-V8_05-IMS65-BD1-TP22-0388-1270
Article Number	7410c005_051
Type of Textile	Bidiagonal Non-Crimp Fabric – Basic
Textile areal weight (incl. sizing, binder, toughener, etc.)	407g/m ² ± 20g/m ²
Carbon fibre areal weight (incl. sizing)	388g/m ² ± 19g/m ²

NCF detail construction

Layer	Material	Areal weight [g/m ²]
5	Powder Binder Hexion EP05311	7
4	Toughener TA1902	5
3	-45° Carbon Fibre: Tenax®-E IMS65 E23 24K 830tex	194
2	Toughener TA1902	5
1	+45° Carbon Fibre: Tenax®-E IMS65 E23 24K 830tex	194

Stitching yarn	CoPa	2.0
Weave	Tricot-Pillar	
Stitching length	2.2 mm	
roll dimension	Paper core: 152mm Fabric width: 1270mm Length: typ. 50m	

Fibre-Orientatoin in acc. to EN13473-1

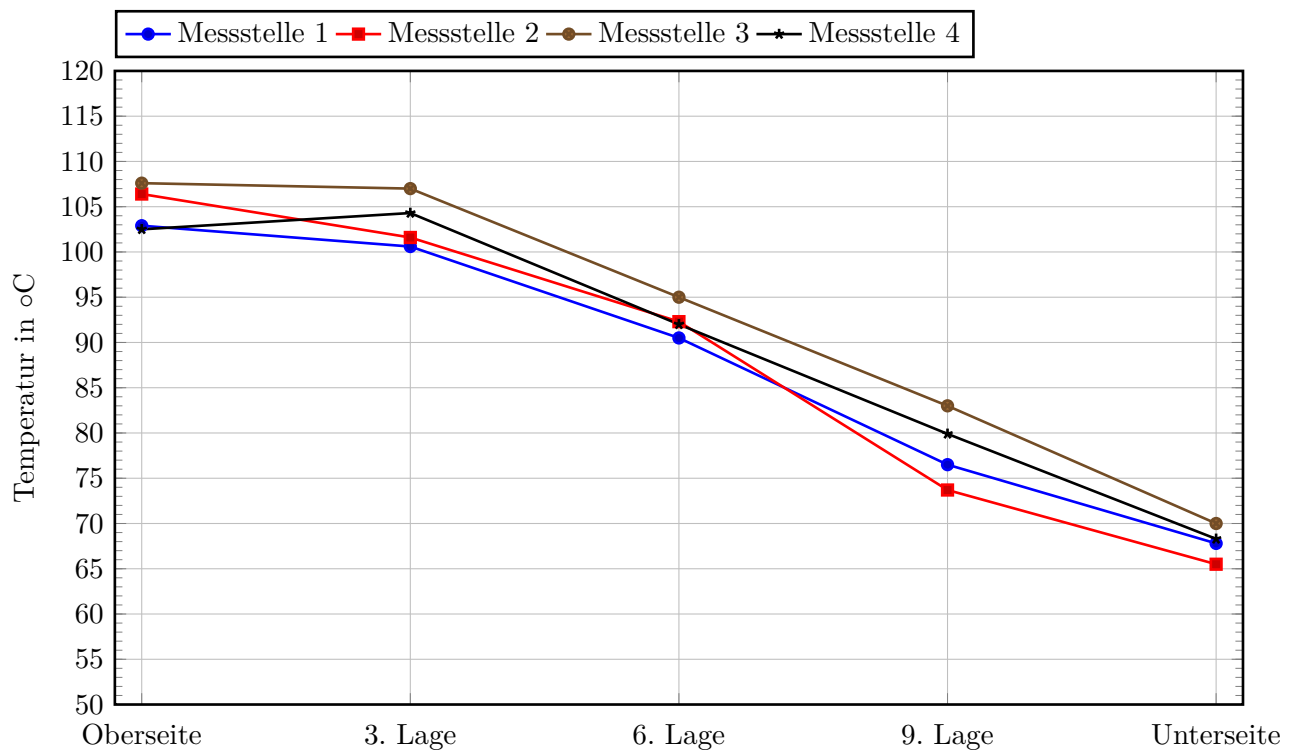
Preforming recommendation: Apply vacuum on preform package and hold for 20min at 120°C.

Toughening system: The Non-woven based toughening system TA1902 is developed for all resin infusions processes with curing temperature of ca. 180°C.

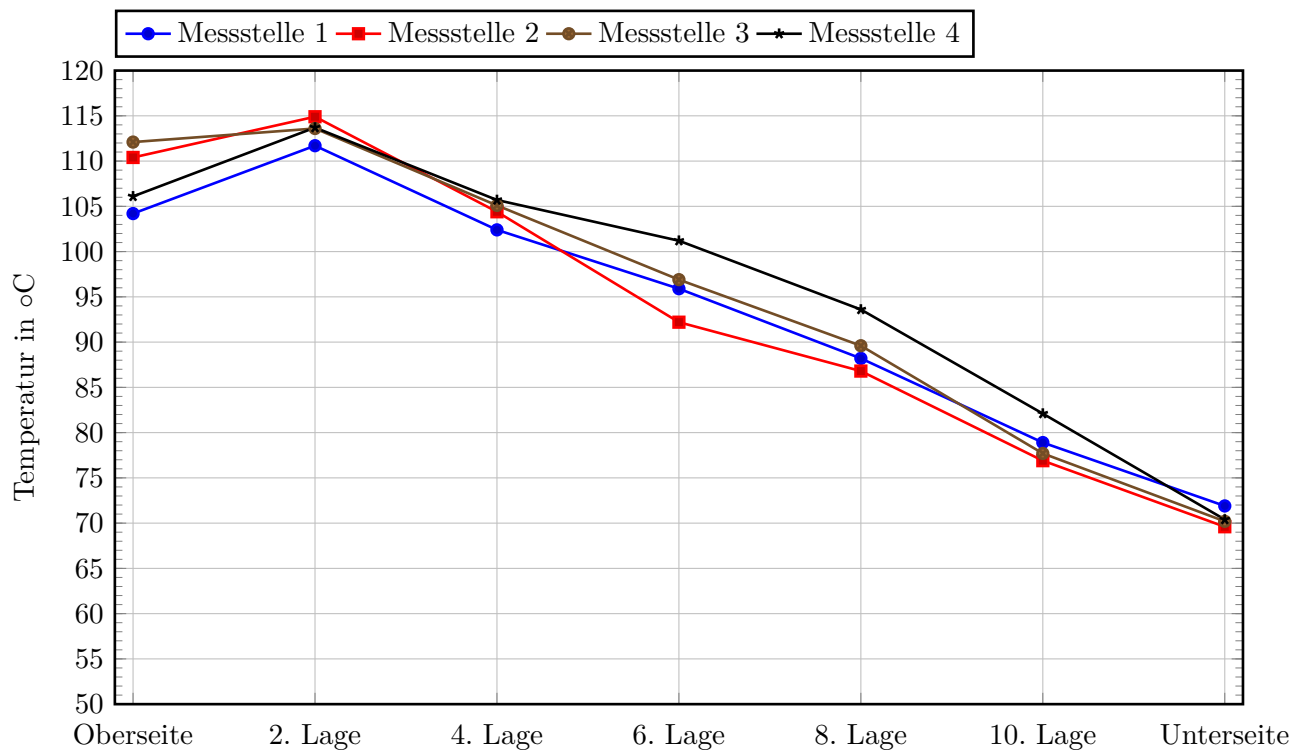
The export or transfer of carbon fibre products can be subject to authorisation, depending on end-use and final destination.

A.2 Diagramme

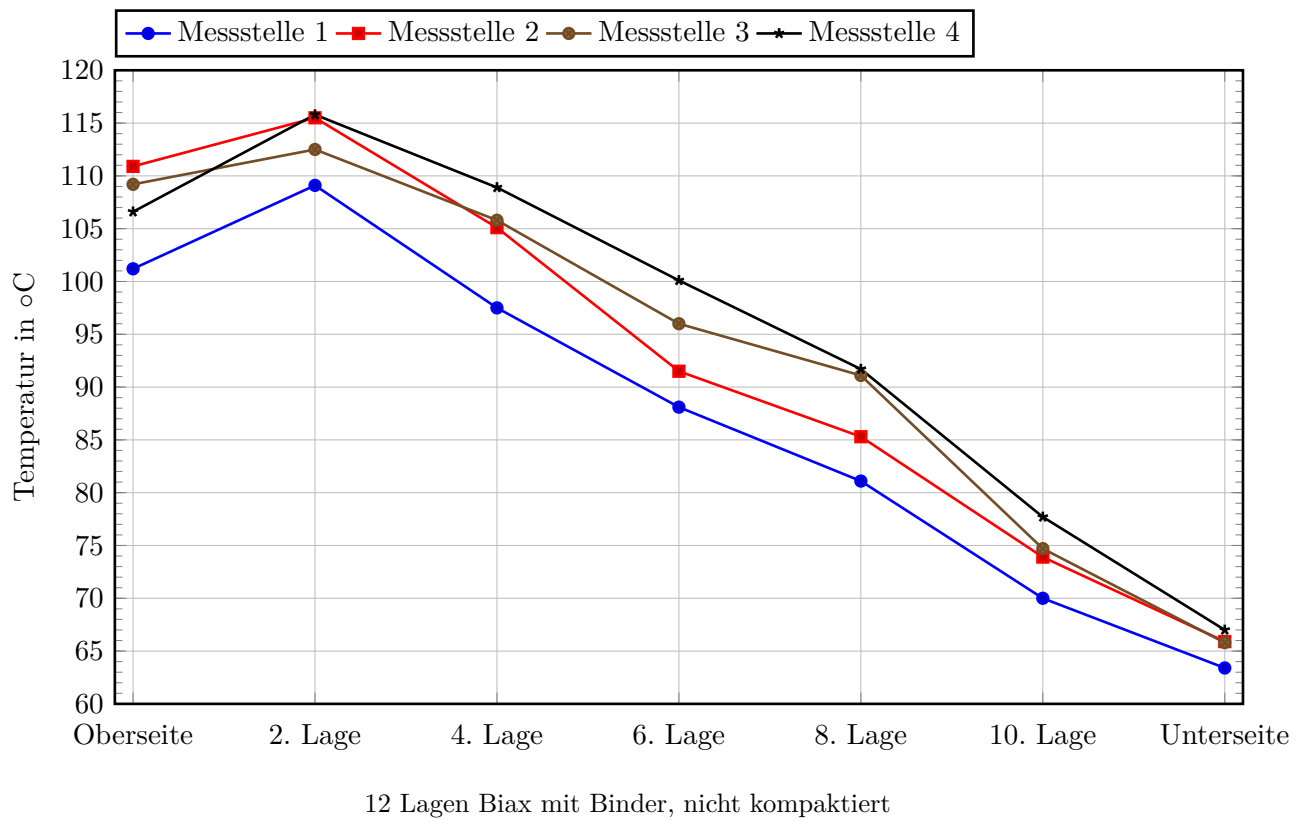
A.2.1 Temperaturverläufe in Dickenrichtung



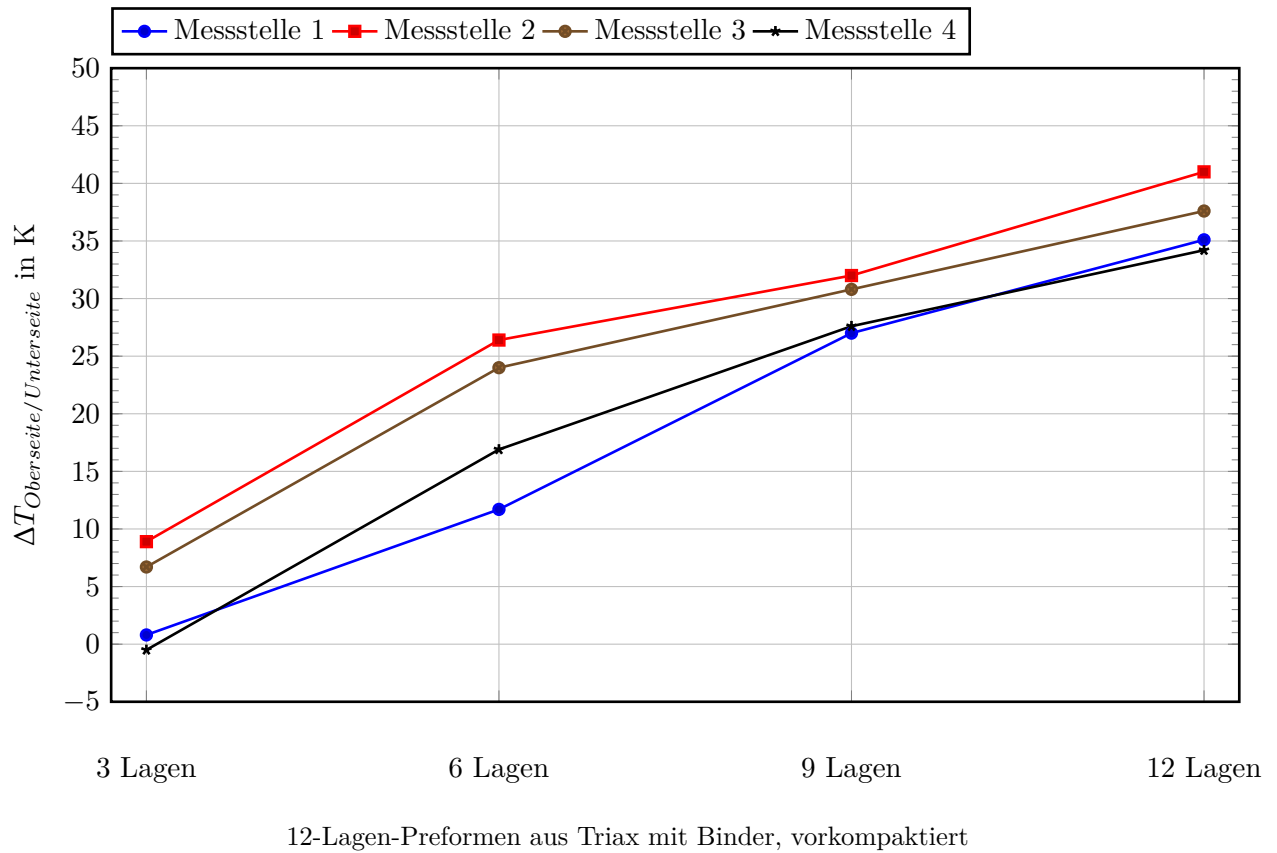
12 Lagen Triax mit Binder, vorkompaktiert



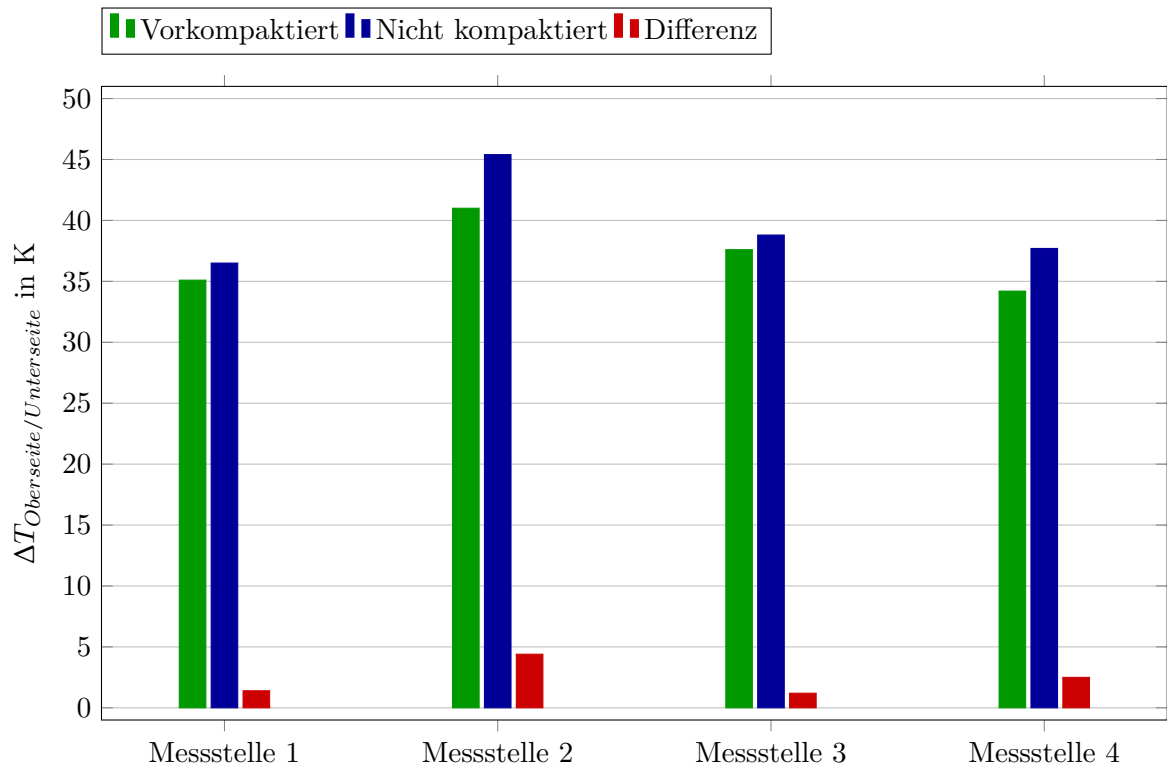
12 Lagen Biax mit Binder, vorkompaktiert



A.2.2 Einflussparameter: Lagenanzahl

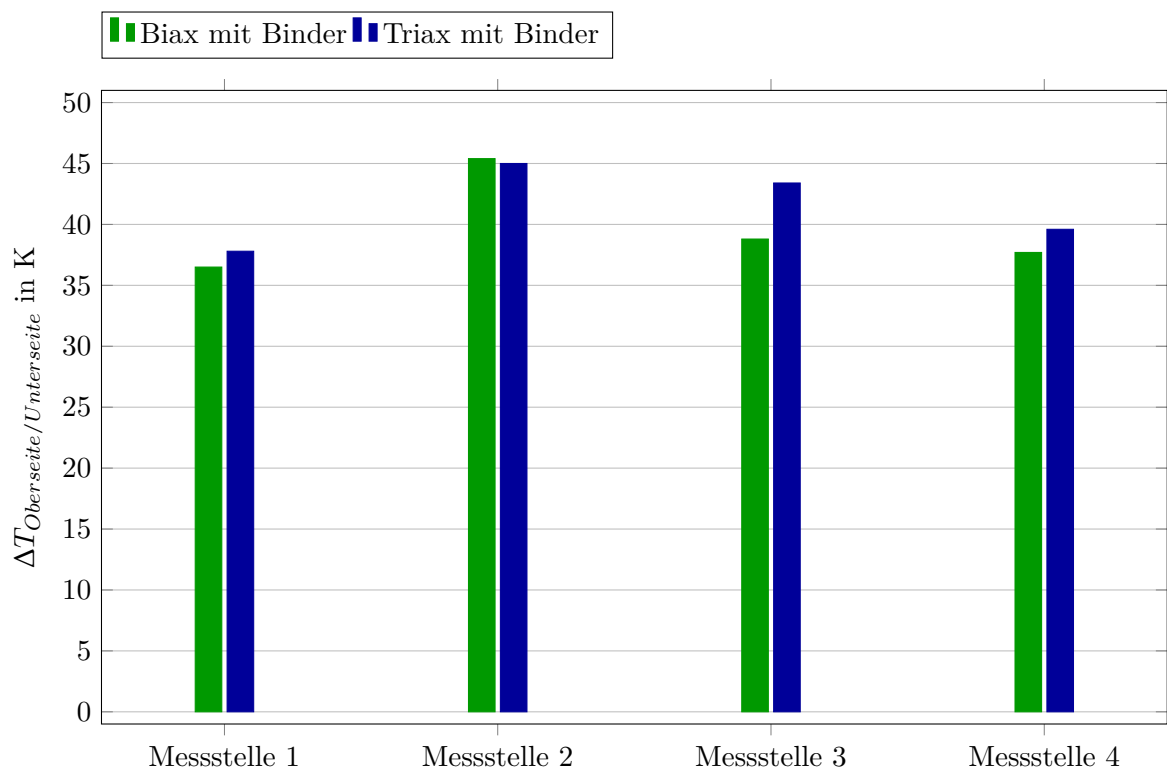


A.2.3 Einflussparameter: Vorkompaktierung



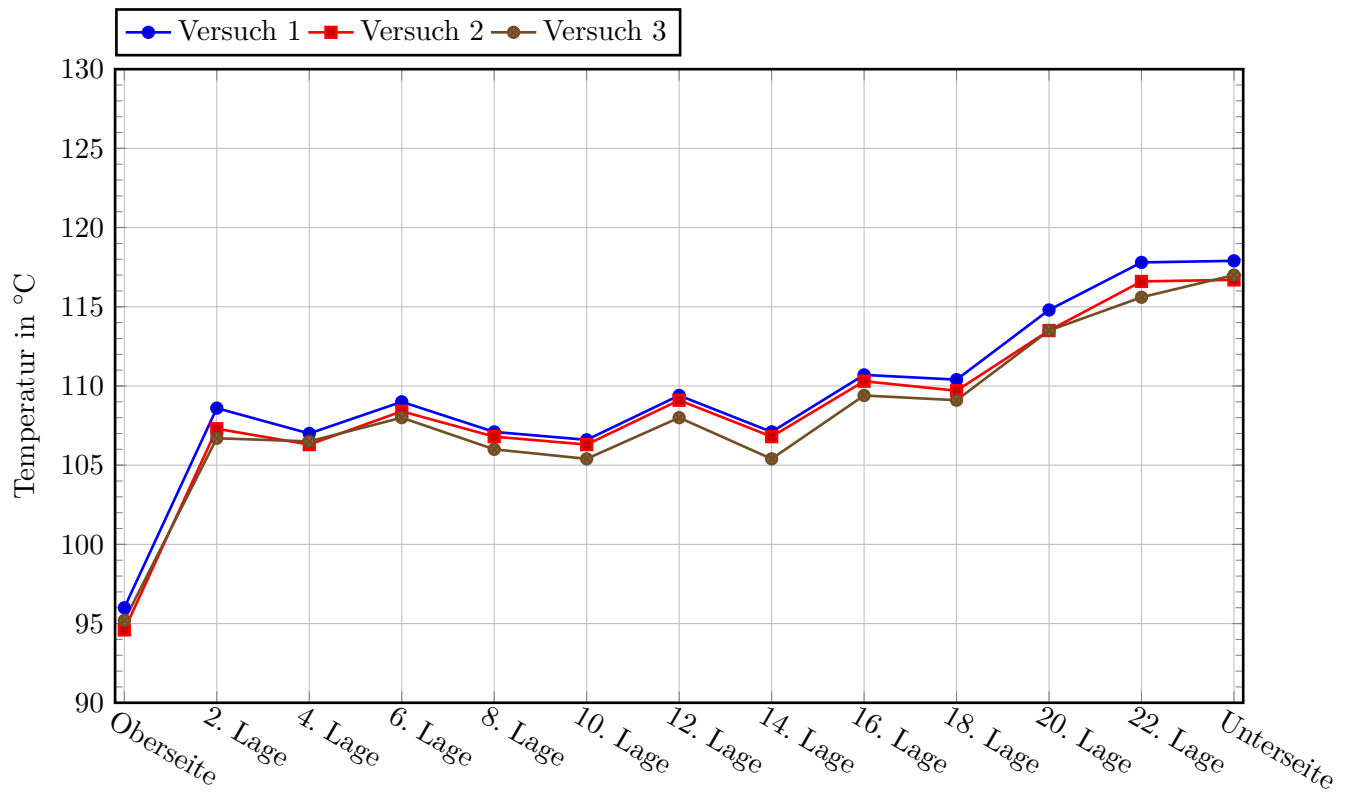
12-Lagen-Preformen aus Triax mit Binder

A.2.4 Einflussparameter: Lagenzusammenstellung

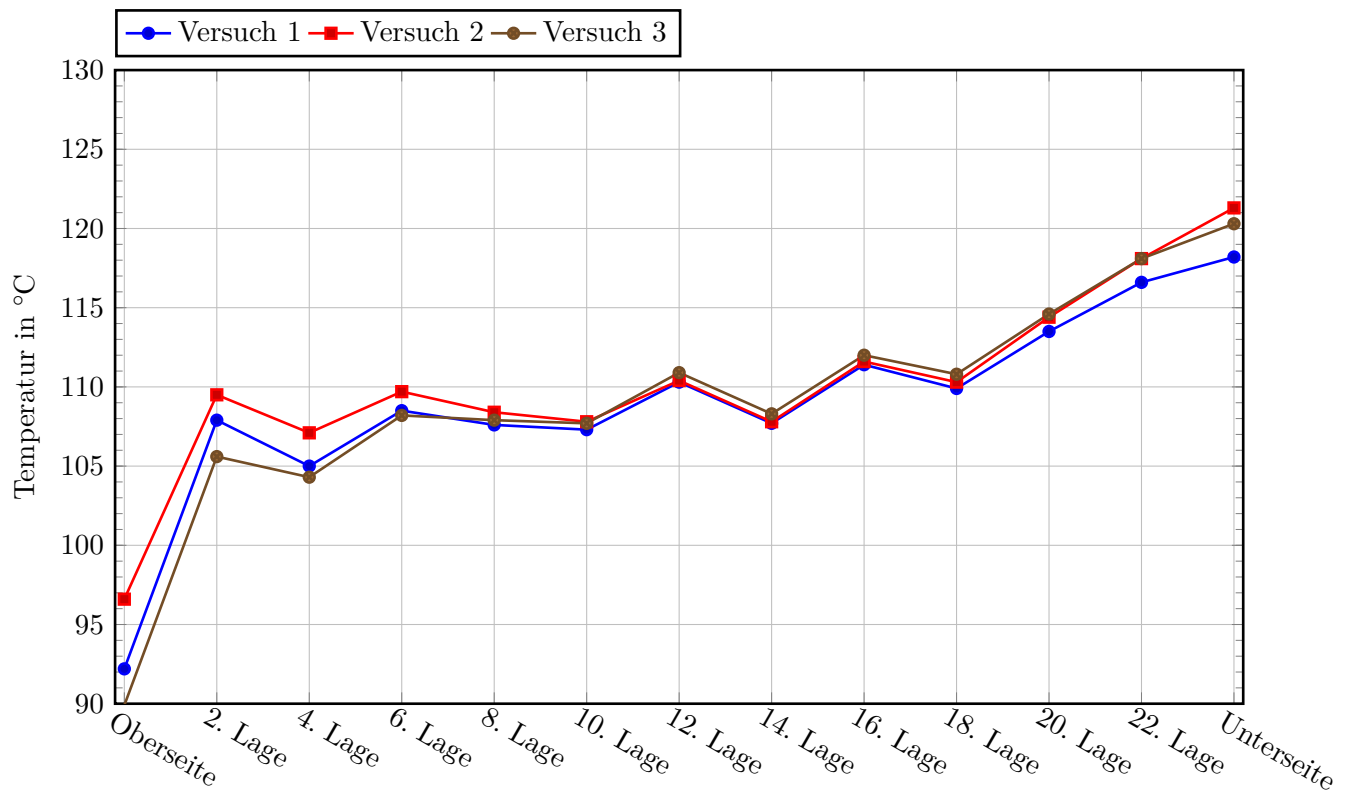


Einflussparameter: Lagenzusammenstellung
(zwei 12-Lagen-Preformen, nicht kompaktiert)

A.2.5 Zweiseitige Bestrahlung



Temperaturverlauf in Dickenrichtung bei zweiseitiger Bestrahlung
(nur Messwerte von Thermoelementen dargestellt)



Temperaturverlauf in Dickenrichtung bei zweiseitiger Bestrahlung
Positionen der IR-Strahler getauscht
(nur Messwerte von Thermoelementen dargestellt)